

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Filip Slatina

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Doc. dr. sc. Goran Šagi, dipl. ing.

Student:
Filip Slatina

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se roditeljima na bezuvjetnoj potpori koju su mi pružili tijekom cijelog obrazovanja.

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Goranu Šagiu na ukazanom vremenu i povjerenju, te na korisnim savjetima koje mi je pružio tijekom pisanja ovog rada.

Filip Slatina



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Filip Slatina**

Mat. br.: 0035191631

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Preinaka osobnog vozila Audi A2 u električno vozilo**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Modification of vehicle Audi A2 in electric vehicle**

Opis zadatka:

U Laboratoriju za motore i vozila nalazi se vozilo Audi A2 koje je pogonjeno Ottovim motorom. Zbog aktualnosti teme električnih vozila planira se preraditi postojeće vozilo u vozilo na električni pogon. Pri planiranju preinake potrebno je razmotriti različite koncepcije električnog pogonskog sustava.

U okviru završnog rada potrebno je:

- Proučiti izvedbe postojećih preinaka konvencionalnih vozila u vozila s električnim pogonom (posebice modela Audi A2) i izvedbe velikoserijskih električnih vozila.
- Napraviti popis potrebnih komponenti i definirati karakteristike vozila.
- Odrediti raspoloživi prostor za ugradnju potrebnih komponenti novog električnog sustava.
- Razmotriti različite mogućnosti ugradnje električnog pogonskog sustava.
- Izraditi proračun energetske potrebe za gradski ciklus vožnje (npr. gradski dio NEDC i WLTP ispitnog ciklusa).
- Dimenzionirati pogonski sustav vozila: karakteristike elektromotora (brzina vrtnje, snaga, moment) i baterija (tehnologija, kapacitet, masa, volumen).
- Proračunati performanse preinačenog vozila s električnim pogonom: ubrzanje, mogućnost svladavanja uspona i sl.
- Izraditi grubi model i dispozicijski crtež s pozicijama komponenti u vozilu.
- Izraditi troškovnik prerade.

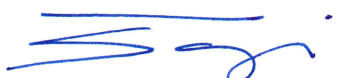
Pri izradi se treba pridržavati uobičajenih pravila za izradu završnog rada. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. studenog 2016.


Rok predaje rada:
1. rok: 24. veljače 2017.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.
3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.
3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Goran Šagi

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
1.1. Povijest električnih vozila	1
1.2. Usporedba aktualnih modela električnih vozila	2
1.2.1. Nissan LEAF.....	2
1.2.2. BMW i3.....	3
1.2.3. VW e-Golf.....	4
1.2.4. Audi A2 DBM Energy/Lekker.....	5
1.3. Audi A2	6
1.3.1. Zahtjevi i željene karakteristike vozila nakon prerade.....	7
2. PRORAČUN OTPORA VOŽNJE I PERFORMANSI VOZILA PRIJE PRERADE.....	8
2.1. WLTC vozni ciklus	8
2.2. Otpori vožnje i potrebne snage.....	10
2.3. Proračun performansi	15
2.3.1. Vučni dijagram.....	15
2.3.2. Ubrzanje	19
3. KOMPONENTE ELEKTRIČNOG VOZILA.....	23
3.1. Elektromotor.....	23
3.2. Pretvarač napona i frekvencije	24
3.3. Baterije.....	25
3.4. Ostale komponente	26
3.5. Raspored komponenti električnog pogona u vozilu	27
4. PRORAČUN OTPORA VOŽNJE I PERFORMANSI ELEKTRIČNOG VOZILA	29
4.1. Otpori vožnje i potrebne snage za električno vozilo	29
4.2. Proračun performansi električnog vozila.....	31

4.2.1. Vučni dijagram.....	31
4.2.2. Ubrzanje električnog vozila	35
5. ANALIZA I UPOREDBA REZULTATA	38
5.1. Usporedba vozila prije i poslije prerade	38
5.2. Potrošnja i emisija CO ₂	39
5.2.1. Električno vozilo	39
5.2.2. Izvorno vozilo	41
6. TROŠAK PRERADE	43
6.1. Troškovnik.....	43
6.2. Analiza isplativosti	43
7. ZAKLJUČAK.....	46
LITERATURA.....	47
PRILOZI.....	49

POPIS SLIKA

Slika 1.1. Ferdinand Porsche i njegov hibrid [1].....	1
Slika 1.2. Nissan LEAF [6]	3
Slika 1.3. BMW i3 [9].....	4
Slika 1.4. Prikaz komponenti električnog sustava (lijevo) i izgled karoserije (desno) [13]	5
Slika 1.5. Audi A2 DBM Energy/Lekker.....	5
Slika 1.6. Audi A2.....	6
Slika 2.1. WLTC Class 3, brzina i ubrzanje.....	9
Slika 2.2. Koeficijent rotirajućih masa [19]	12
Slika 2.3. Sile pojedinih otpora otpora vožnje	14
Slika 2.4. Snage potrebne za savladavanje pojedinih otpora vožnje.....	14
Slika 2.5. Snaga potrebna za savladavanje ukupnih otpora vožnje.....	15
Slika 2.6. Dijagram vučnih sila s ucertanim otporima vožnje pri svladavanju uspona od 5, 10 i 30 %	18
Slika 2.7. Dijagram ubrzanja u pojedinom stupnju prijenosa	20
Slika 2.8. Dijagram trajanja ubrzanja od 0 km/h do maksimalne brzine	22
Slika 3.1. Ansaldo elektromotor i kontroler [20]	24
Slika 3.2. Karakteristika momenta i snage elektromotora	24
Slika 3.3. Karakteristike Li-ionskih baterija [22].....	25
Slika 3.4. Karakteristike baterije Panasonic NCR18650B [23]	26
Slika 3.5. Prikaz rasporeda komponenti električnog pogona	27
Slika 4.1. Sile pojedinih otpora vožnje električnog vozila.....	29
Slika 4.2. Snaga potrebne za svladavanje pojedinih otpora vožnje električnog vozila.....	30
Slika 4.3. Dijagram snage potrebne za svladavanje ukupnih otpora vožnje	30
Slika 4.4. Dijagram vučnih sila elektromotora pri nazivnoj snazi	32
Slika 4.5. Dijagram vučnih sila elektromotora pri vršnoj snazi	33
Slika 4.6. Dijagram vučnih sila električnog vozila s ucertanim otporima vožnje pri svladavanju uspona od 5, 10 i 30 %	34
Slika 4.7. Dijagram ubrzanja u pojedinom stupnju prijenosa	36
Slika 4.8. Dijagram trajanja ubrzanja električnog vozila od 0 km/h do maksimalne brzine ...	37
Slika 5.1. Prikaz neiskorištenog područja između vučne hiperbole i vučnih sila	39
Slika 5.2. Izvori električne energije u Hrvatskoj [24]	40
Slika 6.1. Dijagram isplativosti i povrata investicije	45

POPIS TABLICA

Tablica 1.1. Nissan LEAF, podaci o vozilu	2
Tablica 1.2. BMW i3, podaci o vozilu	3
Tablica 1.3. VW e-Golf, podaci o vozilu	4
Tablica 1.4. Audi A2 DBM Energy/Lekker, podaci o vozilu [14].....	6
Tablica 1.5. Audi A2, podaci o vozilu [15].....	7
Tablica 2.1. Podjela WLTC ciklusa prema kategorijama	8
Tablica 2.2. WLTC Class 3, parametri [17]	9
Tablica 2.3. Podaci o vozilu potrebni za izračunavanje otpora vožnje vozila s MSUI [15, 18]	10
Tablica 2.4. Vrijednosti koeficijenta rotirajućih masa k_m	13
Tablica 2.5. Vučne sile, brzine i momenti motora	16
Tablica 2.6. Nagib podloge u postocima i stupnjevima	17
Tablica 2.7. Otpori vožnje pri svladavanju uspona	17
Tablica 2.8. Vrijednosti ubrzanja u pojedinim stupnjevima prijenosa.....	19
Tablica 2.9. Trajanje ubrzanja od 0 km/h do maksimalne brzine	21
Tablica 3.1. Mase pojedinih komponenti električnog sustava	28
Tablica 4.1. Podaci o vozilu potrebni za izračunavanje otpora vožnje električnog vozila	29
Tablica 4.2. Vučne sile, brzine i momenti motora električnog vozila pri nazivnoj snazi.....	31
Tablica 4.3. Vučne sile, brzine i momenti motora električnog vozila pri vršnoj snazi.....	32
Tablica 4.4. Otpori vožnje električnog vozila pri svladavanju uspona	34
Tablica 4.5. Ubrzanja u pojedinim stupnjevima prijenosa.....	35
Tablica 4.6. Trajanje ubrzanja od 0 km/h do maksimalne brzine	37
Tablica 5.1. Karakteristike izvornog i električnog vozila	38
Tablica 5.2. Emisije CO ₂ prema energentima	40
Tablica 5.3. Ukupna emisija CO ₂ za Hrvatski miks struje.....	41
Tablica 5.4. Emisija CO ₂ po prijeđenom kilometru i WLTC ciklusu	41
Tablica 5.5. Karakteristike benzina i emisija CO ₂ od bušotine do vozila.....	42
Tablica 5.6. Ukupna emisija CO ₂ vozila s Otovim motorom.....	42
Tablica 5.7. Ukupna emisija CO ₂ po prijeđenom kilometru i WLTC ciklusu	42
Tablica 6.1. Troškovnik dijelova električnog pogona potrebnog za preradu vozila	43
Tablica 6.2. Potrošnja i domet s jednim spremnikom	43
Tablica 6.3. Cijena vožnje po kilometru	44

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
a	m/s^2	Ubrzanje vozila
A	m^2	Čeona površina vozila
$a_{i,n=x}$	m/s^2	Ubrzanje u i-tom stupnju prijenosa pri brzini vrtnje motora x
c_w		Koeficijent otpora zraka
D	m	Promjer cilindra
E_i	kWh	Kumulativ utrošene energije
F_a	N	Otpor ubrzanja
f_k		Faktor koeficijenta kotrljanja
F_k	N	Otpor kotrljanja
F_R	N	Ukupni otpori vožnje
F_u	N	Otpor uspona
F_v	N	Vučna sila
$F_{v,i}$	N	Vučna sila u i-tom stupnju prijenosa
F_z	N	Otpor zraka
g	m/s^2	Gravitacijsko ubrzanje (9,81)
H	m	Hod klipa
H_R	m	Visina profila neopterećene gume
$i_{m,i}$		Prijenosni omjer mjenjača i-tog stupnja prijenosa
i_{or}		Prijenosni omjer osovinskog reduktora
$i_{uk,i}$		Ukupan prijenosni omjer u i-tom stupnju prijenosa
k_m		Faktor rotirajućih masa
m	kg	Ukupna masa
m_0	kg	Masa vozila bez pogonskog sustava
$M_{e,max}$	Nm	Najveći efektivni okretni moment motora
m_{es}	kg	Masa komponenti električnog pogonskog sustava
m_{MSUI}	kg	Masa komponenti motora s unutarnjim izgaranjem i ostalih komponenti potrebnih za njegov ispravan rad
m_t	kg	Masa tereta
m_v	kg	Masa praznog vozila

n	min^{-1}	Brzina vrtnje
P_a	kW	Snaga potrebna za svladavanje otpora ubrzanja
P_e	kW	Efektivna snaga motora
$P_{e, \max}$	kW	Najveća efektivna snaga motora
P_k	kW	Snaga potrebna za svladavanje otpora kotrljanja
$P_{\text{kot, max}}$	kW	Najveća snaga na kotačima
P_R	kW	Ukupna snaga potrebna za svladavanje otpora vožnje
P_u	kW	Snaga potrebna za svladavanje otpora uspona
P_z	kW	Snaga potrebna za svladavanje otpora zraka
r	m	Radijus neopterećene gume
R	m	Radijus naplatka
r_d	m	Dinamički polumjer kotača
s	%	Nagib podloge
t	s	Vrijeme
T		Broj taktova
$t_{i, n=x}$	s	Vrijeme u i-tom stupnju prijenosa pri brzini vrtnje motora x
v	km/h, m/s	Brzina
v_0	km/h, m/s	Brzina vjetra
V_H	m^3	Volumen motora
v_i	km/h, m/s	Brzina vožnje u i-tom stupnju prijenosa
$v_{i, n=x}$	km/h, m/s	Brzina u i-tom stupnju prijenosa pri brzini vrtnje motora x
Z		Broj cilindara
α	°	Kut uspona podloge
ΔE_i	Wh	Utrošena energija
Δt	s	Vrijeme prebacivanja stupnja prijenosa
$\eta_{b, p}$		Stupanj korisnosti baterije i punjača
η_{ev}		Stupanj korisnosti od baterije do kotača
η_m		Mehanički stupanj korisnosti prijenosnika
ρ_b	kg/m^3	Gustoća benzina
ρ_z	kg/m^3	Gustoća zraka

SAŽETAK

Obzirom na porast popularnosti električnih vozila, ideja rada je analiza emisija CO₂ i financijska isplativost prerade konvencionalnog vozila u električno vozilo. U radu je proveden proračun otpora vožnje, snage potrebne za svladavanje istih te proračun energetske potrebe vozila Audi A2 koji je u posjedu Fakulteta, odnosno Laboratorija za motore i vozila. Na temelju podataka iz proračuna dimenzioniran je električni pogonski sustav koji bi se kasnijom preradom mogao ugraditi u vozilo, a da ono pritom ne izgubi vozne karakteristike koje posjeduje izvorno vozilo. Zatim je provedena analiza potrošnje goriva/električne struje i emisija CO₂ oba vozila, na osnovi deklarirane potrošnje vozila s Ottovim motorom te vrijednosti dobivenih iz analize energetske potrebe električnog vozila. Na kraju je provedena analiza isplativosti prerade u eksploataciji prema cijenama energenata.

Ključne riječi: električno vozilo, prerada, CO₂, financijska isplativost.

SUMMARY

Considering the increase in popularity of electric vehicles, the main idea of the thesis is analysis of the emission of CO₂ and the financial cost effectiveness of adapting a conventional vehicle to an electric one. The thesis implemented the analysis of the driving resistances, the power necessary to prevail it and the calculation of the energetic requirements of Audi A2 vehicle owned by the Faculty, that is, by the Laboratory for engines and vehicles. Based on the data from the analysis, an electric powertrain has been submitted, which can be embedded in the vehicle, at the same time preserving the original vehicle's driving characteristics. Afterwards, the analysis of the fuel/electric energy consumption and CO₂ emission was conducted, based on the declared consumption of the internal combustion spark-ignition (Otto) engine vehicle and the valuations taken from the analysis of energetic requirements of an electric vehicle. Finally, an analysis on the cost effectiveness in exploitation of the adaptation, according to energy carrier products prices was conducted.

Key words: electric vehicle, adaptation, CO₂ , cost effectiveness

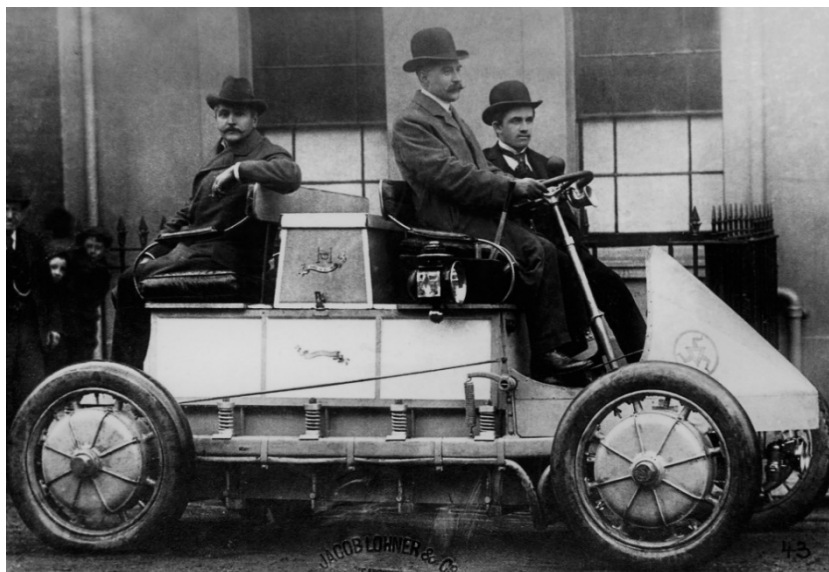
1. UVOD

1.1. Povijest električnih vozila

Svijest i briga o okolišu posljednjih godina je u porastu što za posljedicu ima promjene u načinu života velikog broja ljudi. Takav trend se odrazio i na automobilsku industriju što je za posljedicu imalo ponovnu aktualizaciju električnih vozila. Naime ideja o vozilu pogonjenom električnim motorom pojavila se još sredinom 19. stoljeća.

Robert Anderson je u razdoblju između 1832. – 1839. konstruirao prvo električno vozilo što je više od 20 godina prije konstrukcije prvih motora s unutarnjim izgaranjem (Jean Joseph Étienne Lenoir 1860., Nicolaus August Otto 1867.). Razvoj električnog vozila nastavio se u narednim godinama, ali kao i danas, postojao je problem s baterijama, odnosno njihovim kapacitetom. U razdoblju između 1859. i 1865. Gaston Plante razvija punjive baterije na bazi olova i kiseline što je preteča današnjih akumulatora. Krajem 19. stoljeća, koje se ujedno smatra i zlatnim dobom električnih vozila, u Londonu i New Yorku se pojavljuju flote električnih taxi vozila.

Malo je poznato da je prvo vozilo kojeg je Ferdinand Porsche konstruirao bilo električno vozilo koje je u drugoj verziji postalo hibrid, te da je početkom 20. stoljeća u SAD-u broj električnih vozila bio veći od broja vozila pokretanih motorom s unutarnjim izgaranjem.



Slika 1.1. Ferdinand Porsche i njegov hibrid [1]

Pad popularnosti i prodaje električnih vozila započeo je 1908. kada Henry Ford uvodi serijsku proizvodnju novog vozila naziva Model T što uzrokuje pad cijene vozila odnosno takva vozila postaju cjenovno pristupačna većem broju ljudi. 1912. Charles Kettering patentira elektropokretač za automobile s motorom s unutarnjim izgaranjem te izbacuje ručno pokretanje polugom, kurbлом iz upotrebe što značajno olakšava korištenje takvog vozila. Daljnji pad prodaje električnih automobila se nastavio pronalaskom velikog broja izvora nafte, uglavnom

u SAD-u, što je rezultiralo padom cijene naftnih derivata te tako polako izbacivalo električne automobile s tržišta [2].

Za ponovnu popularizaciju ideje o električnim automobilima zaslužna je nafta. Naime 70-ih i 80-ih godina prošlog stoljeća cijena nafte je porasla što je potaknulo razvoj nove generacije električnih automobila koji su se na tržištu pojavili u 90-ima. Neki od modela su: GM Impact (konceptni automobil), Chrysler TEVan, GM EV1, Nissan Altra EV i drugi [3].

1.2. Usporedba aktualnih modela električnih vozila

Posljednjih godina na tržištu sve je veći broj električnih vozila. Neki od popularnih suvremenih električnih vozila veličinom i namjenom sličnih vozilu iz zadatka uspoređeni su kroz parametre i karakteristike ugrađenih komponenti električnog pogonskog sustava.

1.2.1. Nissan LEAF

Nissan je 2010. godine plasirao na tržište model potpuno električnog vozila pod nazivom LEAF (*engl. Leading Environmentally-friendly Affordable Family car*).

Prva generacija LEAF modela imala je sinkroni AC električni motor snage 80 kW i momenta 280 Nm postavljen poprečno sprijeda uz pogon prednjim kotačima. Za ubrzanje od 0 – 100 km/h potrebno je oko 10 s, a maksimalna brzina iznosi 150 km/h.

Kapacitet baterije od 24 kWh (LMO, *engl. Lithium Manganese Oxide*) je prema tvrdnjama proizvođača trebao osigurati domet od 160 km (NEDC, *engl. New European Driving Cycle*). Posljednjem modelu je kapacitet baterije povećan na 30 kWh te bi trebao biti dostatan za put od 250 km (NEDC). Baterije je moguće napuniti integriranim punjačem koji se nalazi u automobilu i brzim DC punjačem. Za potpuno punjenje integriranim punjačem potrebno je oko 8 sati, DC punjačem je moguće u 30 minuta napuniti baterije od 0 – 80 % kapaciteta [4, 5].

Tablica 1.1. Nissan LEAF, podaci o vozilu

Tip elektromotora	Sinkroni AC
Snaga, [kW]	80
Moment, [Nm]	280
Mjenjač	Jednostupanjski
Vrste baterija	LMO
Napon, [V]	360
Kapacitet, [kWh]	24 ili 30
Vrijeme punjenja, [h]	0,5 - 8
Najveća brzina, [km/h]	150
Domet, [km]	do 250 (NEDC)



Slika 1.2. Nissan LEAF [6]

1.2.2. BMW i3

BMW je predstavio model i3 2013. godine u sklopu projekta *Project i*. To je bilo prvo BMW-ovo potpuno električno vozilo namijenjeno za serijsku proizvodnju.

Motor je, za razliku od LEAF-a, postavljen poprečno iznad stražnje osovine to pogoni stražnje kotače. Motor je sinkroni AC, nazivna snaga iznosi 125 kW, a moment 250 Nm. Maksimalna brzina je ograničena na 150 km/h, a do 100 km/h ubrzava za 7 s.

Kapacitet baterije iznosi 22 kWh (LMO) što je dovoljno da vozilo prijeđe 160 km (NEDC). Model za 2017. godinu će imati povećan kapacitet koji će iznositi 33 kWh, a proizvođač deklarira domet do 300 km (NEDC). Za punjenje se mogu koristiti dvije vrste punjača. Prvi je integrirani punjač u automobilu snage 7,4 kW koji napuni bateriju do punog kapaciteta za 4 sata. Druga mogućnost je DC brzi punjač koji bateriju napuni do 80 % kapaciteta za 30 minuta [7, 8].

Tablica 1.2. BMW i3, podaci o vozilu

Tip elektromotora	Sinkroni AC
Snaga, [kW]	125
Moment, [Nm]	250
Mjenjač	Jednostupanjski
Vrste baterija	LMO
Napon, [V]	350
Kapacitet, [kWh]	22 ili 33
Vrijeme punjenja, [h]	0,5 - 4
Najveća brzina, [km/h]	150
Domet, [km]	do 300 (NEDC)



Slika 1.3. BMW i3 [9]

1.2.3. VW e-Golf

VW je na prvi put predstavio e-Golf na Frankfurtskom motor show-u 2013., a na tržište je plasiran u veljači 2014. godine [10].

Motor je kao i kod Nissan-a smješten poprečno sprijeda te pogoni prednje kotače. I ovdje je pogonski motor sinkroni AC, a vršne vrijednosti snage i momenta su 85 kW i 270 Nm. E-Golf ubrzava od 0 – 100 km/h za 11,8 s, maksimalna brzina je ograničena na 140 km/h.

Baterije su litij-ionske kapaciteta 26,5 kWh što osigurava domet do 150 km (NEDC). Baterijski paket se sastoji od 264 ćelije koje su složene u module po 6 ili 12 komada, a napon iznosi 323 V. Masa baterijskog paketa je 312 kg. Moguće je odabrati između dvije vrste punjača o čemu ovisi trajanje punjenja. Prvi punjač je snage 3,6 kW koji bateriju može napuniti za otprilike 7,5 sati, a drugi je DC punjač snage 7,2 kW kojemu treba oko 3,7 sati [11, 12].

Tablica 1.3. VW e-Golf, podaci o vozilu

Tip elektromotora	Sinkroni AC
Snaga, [kW]	85
Moment, [Nm]	270
Mjenjač	Jednostupanjski
Vrste baterija	Li-ion
Napon, [V]	323
Kapacitet, [kWh]	26,5
Vrijeme punjenja, [h]	3,7 – 7,5
Najveća brzina, [km/h]	140
Domet, [km]	do 150 (NEDC)



Slika 1.4. Prikaz komponenti električnog sustava (lijevo) i izgled karoserije (desno) [13]

1.2.4. Audi A2 DBM Energy/Lekker

Iako Audi nije izradio električni A2, postoje neki primjerci koje su njihovi vlasnici preradili. Najveću pažnju sigurno privlači prerada koju ju su izradile tvrtke DBM Energy i Lekker.



Slika 1.5. Audi A2 DBM Energy/Lekker

Vlasnici navode da je domet s jednim punjenjem veći od 600 km što su i potvrdili testom vozeći se od Münchena do Berlina tijekom noći. Takve performanse su postigli koristeći novorazvijene KOLIBRI AlphaPolymer Technology (LMP – litij metal polimer) baterije čiji je kapacitet 98,8 kWh, a postotak iskoristive energije 97 %. Vlasnici također navode da je moguće napuniti cijeli kapacitet baterije za samo 6 minuta, ali ne navode kojim točno tipom punjača je to izvedivo. Jednostavnom matematikom se dobije vrijednost od skoro 1000 kW koja bi bila potrebna za punjenje cijelog kapaciteta baterije u 6 minuta.

Tablica 1.4. Audi A2 DBM Energy/Lekker, podaci o vozilu [14]

Tip elektromotora	-
Snaga, [kW]	55
Moment, [Nm]	-
Mjenjač	-
Vrste baterija	LMP
Napon, [V]	-
Kapacitet, [kWh]	98,8
Vrijeme punjenja, [h]	-
Najveća brzina, [km/h]	-
Domet, [km]	> 600

1.3. Audi A2

Za preradu vozila na električni pogon odabran je Audi A2 s 1,4 litrenim Ottovim motorom snage 55 kW i momentom 126 Nm. Više je razloga zbog kojih je odabrano upravo ovo vozilo. Prvi je taj što je Fakultet, odnosno Laboratorij za motore i vozila u vlasništvu jednog primjerka. Drugi razlog je taj što A2 ima nizak koeficijent otpora zraka c_w . Treći razlog je mala masa praznog vozila zbog aluminijske šasije. Četvrti razlog je dovoljno prostora za smještaj baterija bez oduzimanja putničkog prostora.



Slika 1.6. Audi A2

Podaci o vozilu su dani u tablici 1.5.

Tablica 1.5. Audi A2, podaci o vozilu [15]

Masa/nosivost	895/485 kg
Obujam/kompresija	1390 cm ³ /11,0:1
Snaga	55 kW
Moment	126 Nm
Mjenjač	Ručni, 5 stupnjeva
Oznaka gume	175/60 R 15 H
Najveća brzina	173 km/h
Ubrzanje od 0 – 100 km/h	12,0 s
Spremnik goriva	34 dm ³
Potrošnja, mješovita vožnja	6,0 dm ³ /100 km

1.3.1. Zahtjevi i željene karakteristike vozila nakon prerade

Prema podacima Centra za vozila Hrvatske [16] prosječno godišnje prijeđeni put vozila kategorije M1 iznosi 12516,68 km. Ako se taj broj podjeli na 52 tjedna dobije se prosječno tjedno prijeđeni put koji iznosi 240,7 km. Ako se želi tjedno puniti vozilo dva do tri puta potrebno je imati kapacitet baterije dovoljan za put od oko 130 km s jednim punjenjem. Taj iznos će biti jedan od zahtjeva za električno vozilo.

Mnogi ljudi svakodnevno koriste dionice autoceste na putovanjima. Da vozilo ne bi predstavljalo opasnost u prometu trebalo bi moći postići brzinu od 130 km/h.

U gradskoj vožnji su vrlo česta zaustavljanja i kretanja iz mirovanja pa je poželjno da vozilo ima solidno ubrzanje kako ne bi stvaralo zastoje na prometnicama. Zbog toga je postavljen zahtjev da vozilo mora imati ubrzanje od 0 – 100 km/h kraće od 14 s.

U Hrvatskoj je nazivni napon mreže za kućanstva 230 V i nazivna struja 16 A što daje mogućnost snage punjenja od maksimalno 3,68 kW u idealnom slučaju. Većina vlasnika električnih vozila punjenje obavlja tijekom noći zbog niže tarife električne struje, pa je zbog toga određen zahtjev da vrijeme punjenja ne bude dulje od 8 h. Pri dimenzioniranju baterije valja uzeti u obzir i taj podatak.

Postavljena su još dva zahtjeva koja se tiču komfora i dinamike automobila. Prvi zahtjev je da ne smije doći do smanjenja putničkog prostora, a drugi je da masa praznog vozila nakon prerade ne bude veća od 1100 kg kako se ne bi značajno narušila dinamika vozila, te smanjila udobnost i sigurnost vožnje.

2. PRORAČUN OTPORA VOŽNJE I PERFORMANSI VOZILA PRIJE PRERADE

2.1. WLTC vozni ciklus

Analize energetske potrebe vozila obično se provode prema standardiziranim voznim ciklusima (NEDC, WLTC, UDDS...) kako bi se mogle raditi usporedbe s ostalim vozilima na tržištu (potrošnja goriva, emisije CO₂).

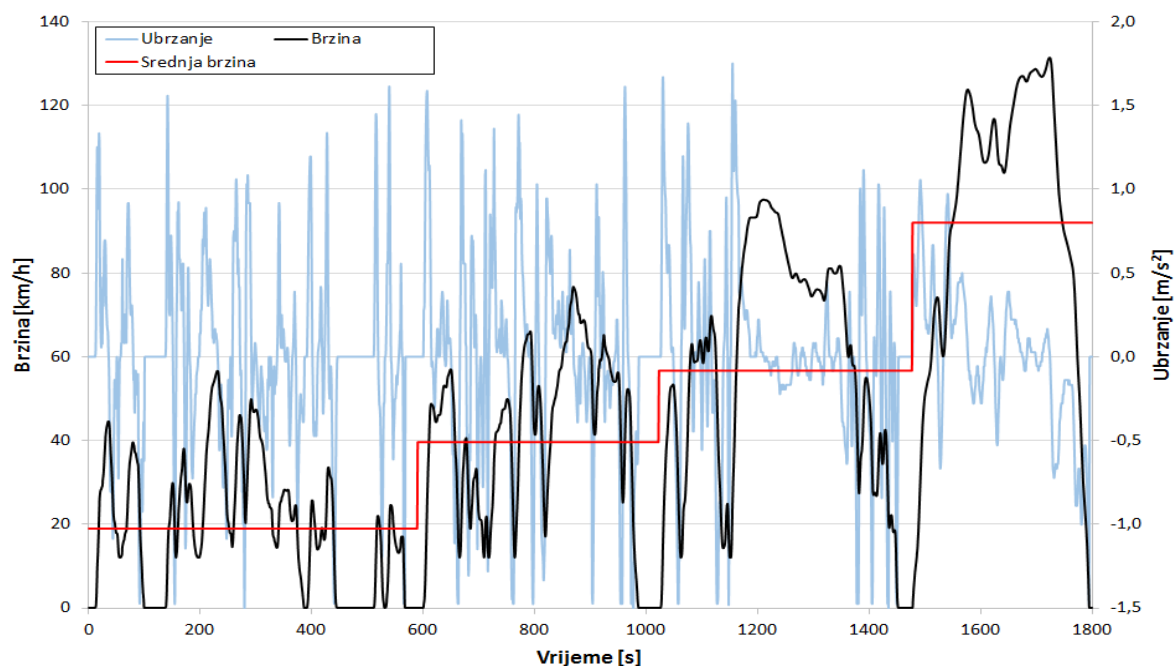
WLTC (*engl. The Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles*) je vozni ciklus prema kojem se računaju potrošnja goriva i emisije ispušnih plinova za osobna i laka teretna vozila [18]. Postoje tri kategorije WLTC voznog ciklusa, Class 1, Class 2 i Class 3. Kategorije se dijele prema omjeru snage motora i mase praznog vozila (*engl. power-to-mass*, PMR). Podjela u kategorije je prikazana u tablici 2.1.

Tablica 2.1. Podjela WLTC ciklusa prema kategorijama

Kategorija	PMR, W/kg
Class 1	$PMR \leq 22$
Class 2	$22 < PMR \leq 34$
Class 3	$34 < PMR$

Audi A2 sa snagom motora od 55 kW i masom praznog vozila od 895 kg spada u kategoriju Class 3. Ovaj ciklus se sastoji od četiri faze: Low, Middle, High i Extra-High. Faze predstavljaju područja s različitim srednjim brzinama vožnje, počevši od Low s najmanjom brzinom pa sve do Extra-High u kojoj se ostvaruju brzine preko 120 km/h.

Na slici 2.1. su prikazani brzina i ubrzanje WLTC, Class 3 voznog ciklusa.



Slika 2.1. WLTC Class 3, brzina i ubrzanje

Tablica 2.2. prikazuje osnovne parametre WLTC Class 3 voznog ciklusa kao što su trajanje faza, minimalno i maksimalno ubrzanje, trajanje zaustavljanja, prijeđeni put itd.

Tablica 2.2. WLTC Class 3, parametri [17]

Faza	Trajanje ciklusa	Trajanje zaustavljanja	Postotno trajanje zaustavljanja	Prijeđeni put	Maksimalna brzina	Srednja brzina	Min. ubrzanje	Maks. ubrzanje
	[s]	[s]	[%]	[m]	[km/h]	[km/h]	[m/s²]	[m/s²]
Low	589	156	26,5	3095	56,5	18,9	-1,47	1,47
Middle	433	48	11,1	4756	76,6	39,5	-1,49	1,57
High	455	31	6,8	7158	97,4	56,6	-1,49	1,58
Extra-High	323	7	2,2	8254	131,3	92,0	-1,21	1,03
Ukupno	1800	242	13,4	23263				

2.2. Otpori vožnje i potrebne snage

Kako bi se odredile energetske potrebe vozila potrebno je prvo izračunati otpore vožnje za određeni vozni ciklus, a zatim iz njih potrebnu snagu za savladavanje otpora i na kraju utrošenu energiju.

Osnovni otpori vožnje su otpori kotrljanja i otpori zraka. Od ostalih otpora koji se javljaju tijekom vožnje najutjecajniji su otpor uspona i otpor ubrzanja, a ostali će u ovom proračunu biti zanemareni. Kao što je već navedeno, proračun otpora vožnje računa se na osnovu WLTC voznog ciklusa u kojem je kut uspona podloge $\alpha = 0^\circ$. Zbog toga otpora uspona neće biti, odnosno otpor uspona i potrebna snaga za savladavanje otpora uspona će biti jednaki nuli.

Podaci o vozilu potrebni za izračunavanje otpora vožnje dani su u tablici 2.3.

Tablica 2.3. Podaci o vozilu potrebni za izračunavanje otpora vožnje vozila s MSUI [15, 18]

Masa praznog vozila, m_v	[kg]	895
Masa tereta, m_t	[kg]	200
Ukupna masa, m	[kg]	1095
Čeona površina vozila, A	[m ²]	2,2
Koeficijent otpora zraka, c_w	[-]	0,28
Gustoća zraka, ρ_z	[kg/m ³]	1,204
Faktori koeficijenta kotrljanja, f_k		
$f_{k,1}$	[-]	0,0090
$f_{k,2}$	[-]	0,0020
$f_{k,3}$	[-]	0,0003
Mehanički stupanj korisnosti prijenosnika, η_m	[-]	0,95
Prijenosni omjer mjenjača 1. brzine, $i_{m,1}$	[-]	3,45
Prijenosni omjer mjenjača 2. brzine, $i_{m,2}$	[-]	2,10
Prijenosni omjer mjenjača 3. brzine, $i_{m,3}$	[-]	1,39
Prijenosni omjer mjenjača 4. brzine, $i_{m,4}$	[-]	1,03
Prijenosni omjer mjenjača 5. brzine, $i_{m,5}$	[-]	0,81
Prijenosni omjer osovinskog reduktora, i_{or}	[-]	3,88
Vrijeme prebacivanja stupnja prijenosa, Δt	[s]	0,25
Gustoća benzina, ρ_b	[kg/m ³]	750
Hod klipa, H	[m]	0,0756
Promjer cilindra, D	[m]	0,0765
Broj cilindara, Z	[-]	4
Volumen motora, V_H	[m ³]	0,001390
Broj taktova, T	[-]	4
Najveća efektivna snaga motora, $P_{e,max}$	[kW]	55,4*

Pri brzini vrtnje, n	$[\text{min}^{-1}]$	4996
Najveća snaga na kotačima, $P_{\text{kot, max}}$	$[\text{kW}]$	52,63
Najveći okretni moment motora, $M_{\text{e, max}}$	$[\text{Nm}]$	114,7*
Pri brzini vrtnje, n	$[\text{min}^{-1}]$	3998
Oznaka gume	175/60 R 15 H	
Radius naplatka, R	$[\text{m}]$	0,1905
Visina profila neopterećene gume, H_R	$[\text{m}]$	0,105
Radius neopterećene gume, r	$[\text{m}]$	0,2955
Dinamički polumjer kotača, r_d	$[\text{m}]$	0,2866

*Vrijednosti su preuzete iz [18] zbog poznatih vrijednosti za ostatak radnog područja motora. Proračun je proveden s tim vrijednostima.

Otpor kotrljanja se računa prema izrazu:

$$F_k = f_k \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha), [\text{N}], \quad (2.1)$$

gdje su:

f_k – faktor otpora kotrljanja, [-],

m – ukupna masa vozila (masa praznog vozila i opterećenje), [kg],

g – gravitacijsko ubrzanje (9,81), $[\text{m/s}^2]$,

α – kut uspona podloge, $[\circ]$.

Faktor otpora kotrljanja f_k je ovisan o brzini, a računa se prema izrazu:

$$f_k = f_{k,1} + f_{k,2} \cdot \frac{v}{100} + f_{k,3} \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^4, [-], \quad (2.2)$$

gdje je:

v – brzina vožnje, $[\text{km/h}]$,

Vrijednosti faktora otpora kotrljanja iz tablice 2.3. odnose se na radijalnu gumu brzinske oznake H (do 210 km/h) pri nazivnom tlaku od $p = 2$ bar [19].

Otpor zraka se računa prema izrazu:

$$F_z = \frac{1}{2} \cdot \rho_z \cdot c_w \cdot A \cdot (v + v_0)^2, [\text{N}], \quad (2.3)$$

gdje su:

ρ_z – gustoća zraka, $[\text{kg/m}^3]$,

c_w – koeficijent otpora zraka, [-],

A – poprečna površina vozila, $[m^2]$,

v – brzina vozila, $[m/s]$,

v_0 – brzina vjetra, $[m/s]$.

Otpor uspona se računa prema izrazu:

$$F_u = m \cdot g \cdot \sin(\alpha), [N]. \quad (2.4)$$

Otpor ubrzanja se računa prema izrazu:

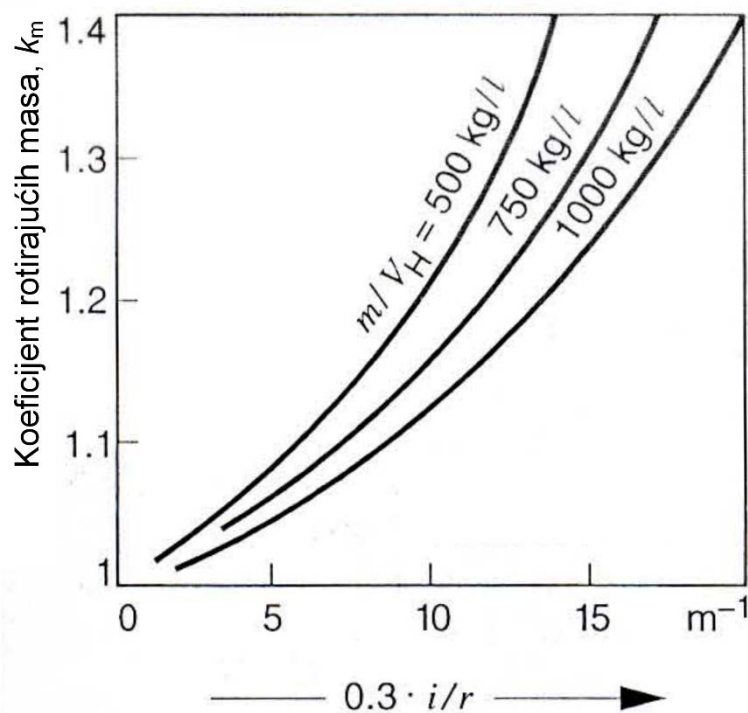
$$F_a = m \cdot k_m \cdot a, [N], \quad (2.5)$$

gdje su:

k_m – faktor rotirajućih masa, $[-]$,

a – ubrzanje vozila, $[m/s^2]$.

Faktor rotirajućih masa k_m se određuje prema dijagramu koji je prikazan na slici 2.2.



Slika 2.2. Koefficient rotirajućih masa [19]

Da bi se iz dijagrama mogao očitati koefficient rotirajućih masa, potrebno je odrediti omjer mase praznog vozila m_v i radnog volumena motora V_H te aproksimirati krivulju za dobiveni omjer u dijagram. Za Audi A2 taj omjer iznosi:

$$\frac{m_v}{V_H} = \frac{895}{1,390} = 644 \frac{kg}{l}. \quad (2.6)$$

Zatim je potrebno izračunati omjer ukupnog prijenosnog omjera za svaki stupanj prijenosa $i_{uk,i}$ i dinamičkog radijusa kotača r_d , te je nakon toga moguće očitati vrijednost koeficijenta rotirajućih masa. Iznosi omjera $i_{uk,i}/r_d$ i koeficijenta k_m prikazani su u tablici 2.4.

Tablica 2.4. Vrijednosti koeficijenta rotirajućih masa k_m

Stupanj prijenosa	1	2	3	4	5
$0,3 \cdot \frac{i_{uk,i}}{r_d}, [m^{-1}]$	14,01	8,53	5,65	4,18	3,29
$k_m [-]$	1,29	1,14	1,07	1,06	1,04

Ukupni otpori vožnje jednaki su zbroju otpora kotrljanja, zraka, uspona i ubrzanja

$$F_R = F_k + F_z + F_u + F_a, [N]. \quad (2.7)$$

Snaga potrebna za svladavanje otpora kotrljanja računa se prema izrazu:

$$P_k = F_k \cdot v = f_k \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot v, [kW], \quad (2.8)$$

gdje je:

v – brzina vozila, [m/s].

Snaga potrebna za svladavanje otpora zraka računa se prema izrazu:

$$P_z = F_z \cdot v = \frac{1}{2} \cdot \rho_z \cdot c_w \cdot A \cdot (v + v_0)^2 \cdot v, [kW]. \quad (2.9)$$

Snaga potrebna za svladavanje otpora uspona računa se prema izrazu:

$$P_u = F_u \cdot v = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot v, [kW]. \quad (2.10)$$

Snaga potrebna za svladavanje otpora ubrzanja računa se prema izrazu:

$$P_a = F_a \cdot v = m \cdot k_m \cdot a \cdot v, [kW]. \quad (2.11)$$

Ukupna snaga potrebna za svladavanje otpora vožnje jednaka je zbroju snaga potrebnih za svladavanje otpora kotrljanja, zraka, uspona i ubrzanja

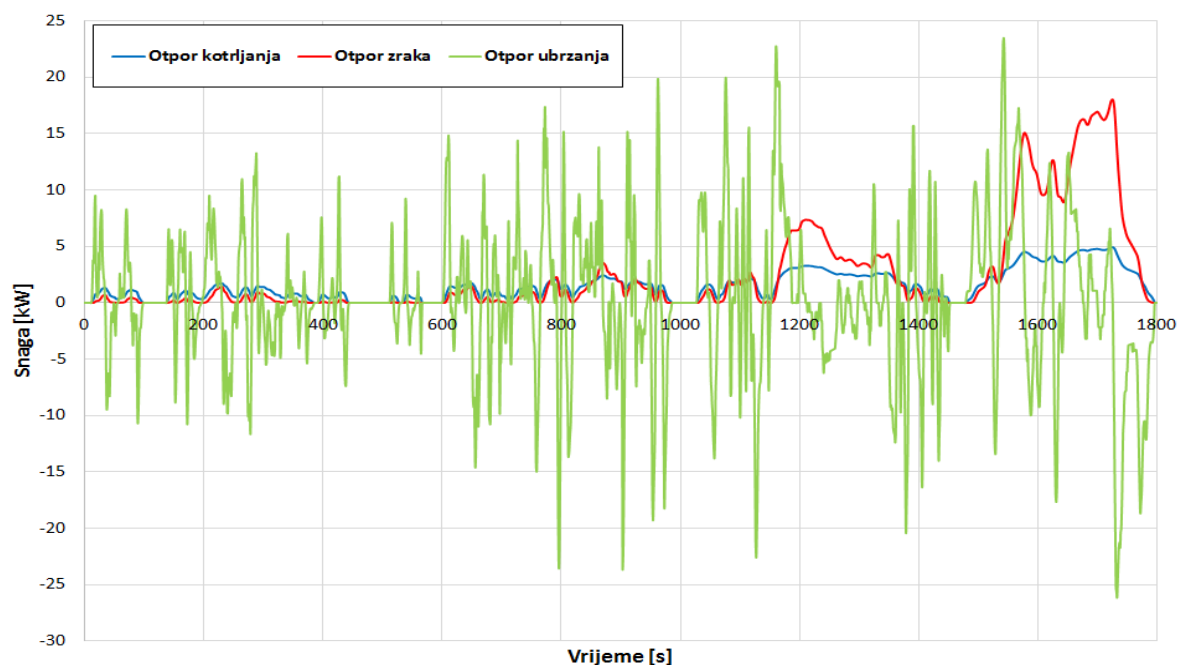
$$P_R = P_k + P_z + P_u + P_a = (F_k + F_z + F_u + F_a) \cdot v = F_R \cdot v, [kW]. \quad (2.12)$$

Sile otpora vožnje za Audi A2 prema WLTC voznom ciklusu prikazane su na slici 2.3.



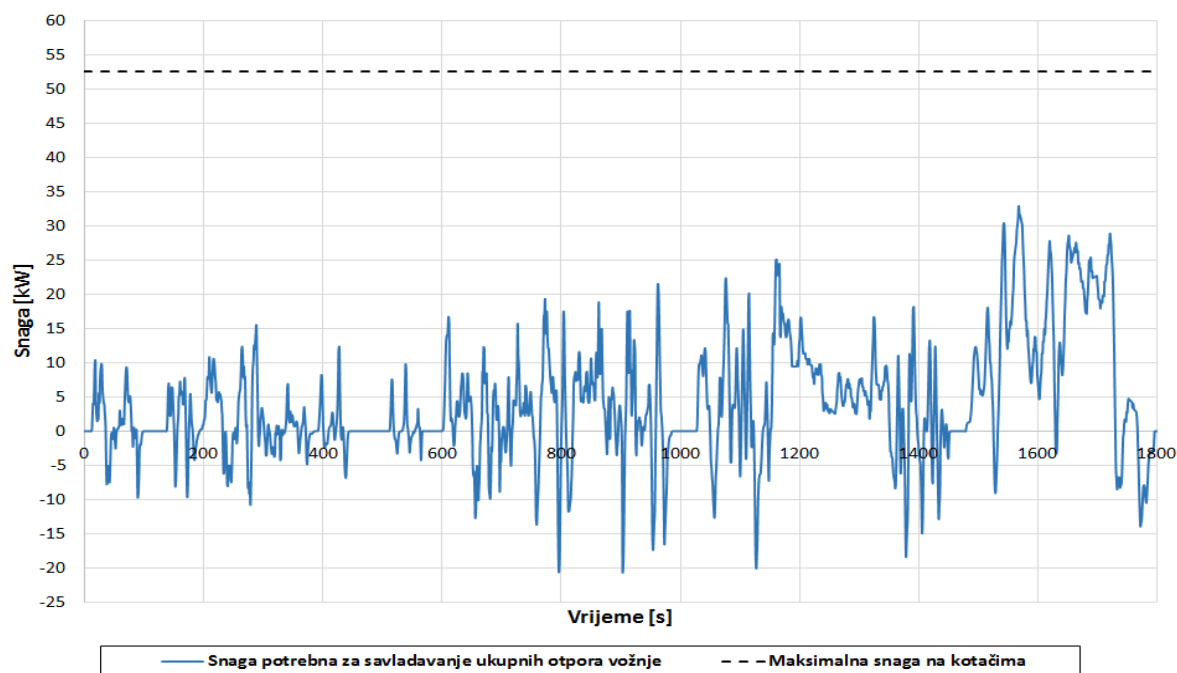
Slika 2.3. Sile pojedinih otpora otpora vožnje

Na slici 2.4. su prikazane krivulje snaga potrebnih za savladavanje pojedinih otpora vožnje, dok je na slici 2.5. prikazana ukupna snaga potrebna za savladavanje otpora vožnje uz ucrtanu maksimalnu raspoloživu snagu na pogonskim kotačima.



Slika 2.4. Snage potrebne za savladavanje pojedinih otpora vožnje

Vidljivo je da najveća vrijednost snage potrebne za savladavanje otpora iznosi oko 33 kW, a najveća snaga na kotačima iznosi 52,63 kW. Prema tim vrijednostima će se odabirati električni motor odgovarajuće snage.



Slika 2.5. Snaga potrebna za savladavanje ukupnih otpora vožnje

Prema izračunatim podacima odabran je elektromotor (EM) nazivne snage 30 kW iako u dvije točke postoji kratkotrajna potreba za nešto višom snagom od 30 kW, ali to neće predstavljati problem. Razlika između deklariranja snage kod motora s unutarnjim izgaranjem (MSUI) i EM je taj što se kod MSUI deklarira najveća snaga postignuta u jednoj točki radnog područja broja okretaja, dok se kod EM deklarira ona snaga koju motor može konstantno isporučivati bez pregrijavanja. Više detalja o odabiru EM nalazi se u poglavlju 3, Komponente električnog vozila.

2.3. Proračun performansi

2.3.1. Vučni dijagram

Za izradu vučnog dijagrama potrebno je izračunati vučnu hiperbolu za konstantnu maksimalnu efektivnu snagu motora. Vučna hiperbola računa se prema izrazu:

$$F_v = \frac{P_{e,max} \cdot \eta_m}{v}, [N], \quad (2.13)$$

gdje su:

$P_{e,max} = 55,4$ kW - maksimalna efektivna snaga motora,

$\eta_m = 0,95$ – mehanički stupanj korisnosti prijenosnika.

Sila dovedena pogonskom kotaču u pojedinom stupnju prijenosa se računa prema izrazu:

$$F_{v,i} = \frac{M_e \cdot i_{or} \cdot i_{m,i} \cdot \eta_m}{r_d}, [\text{N}], \quad (2.14)$$

gdje su:

M_e – efektivni moment motora, [Nm],

i_{or} – prijenosni omjer osovinske redukcije, [-],

$i_{m,i}$ – prijenosni omjer stupnja prijenosa, [-],

r_d – dinamički radijus kotača, [m].

Dinamički radijus kotača može se očitati u tablicama ako su dostupne, izračunati iz oznake gume prema empirijskom izrazu ili iz brzine vožnje i brzine vrtnje motora.

Brzina vožnje u pojedinom stupnju prijenosa računa se prema izrazu:

$$v_i = \frac{3,6 \cdot \pi \cdot r_d \cdot n}{30 \cdot i_{or} \cdot i_{m,i}}, [\text{km/h}], \quad (2.15)$$

gdje je:

n – brzina vrtnje motora, [min^{-1}].

Tablica 2.5. Vučne sile, brzine i momenti motora

n [min^{-1}]	M_e [Nm]	v_1 [km/h]	F_{v1} [N]	v_2 [km/h]	F_{v2} [N]	v_3 [km/h]	F_{v3} [N]	v_4 [km/h]	F_{v4} [N]	v_5 [km/h]	F_{v5} [N]
1000	87,8	8	3895	13	2371	20	1569	27	1163	34	915
1250	91,6	10	4064	17	2474	25	1637	34	1213	43	954
1500	95,4	12	4232	20	2576	30	1705	41	1264	52	994
1750	99,2	14	4401	23	2679	35	1773	47	1314	60	1033
2000	102,9	16	4565	27	2779	40	1839	54	1363	69	1072
2250	104,7	18	4645	30	2827	45	1871	61	1387	77	1091
2500	106,5	20	4725	33	2876	50	1904	68	1411	86	1109
2750	107,8	22	4783	36	2911	55	1927	74	1428	95	1123
3000	109,0	24	4836	40	2944	60	1948	81	1444	103	1135
3250	111,1	26	4929	43	3000	65	1986	88	1472	112	1157
3500	113,1	28	5018	46	3054	70	2022	95	1498	120	1178
3750	113,4	30	5031	50	3062	75	2027	101	1502	129	1181

4000	114,7	32	5089	53	3097	80	2050	108	1519	138	1195
4250	113,6	34	5040	56	3068	85	2031	115	1505	146	1183
4500	112,4	36	4987	60	3035	90	2009	122	1489	155	1171
4750	107,5	38	4769	63	2903	95	1922	128	1424	163	1120
5000	105,8	40	4694	66	2857	100	1891	135	1401	172	1102
5250	96,0	42	4259	70	2592	105	1716	142	1272	181	1000
5500	87,3	44	3873	73	2358	110	1560	149	1156	189	909

Da bi provjerili mogućnost svladavanja uspona podloge od 5, 10 i 30 % uz konstantnu brzinu vožnje ponovo će se koristiti izrazi (2.1), (2.3) i (2.4). U ovom slučaju će otpor ubrzanja biti jednak nuli.

Kut uspona podloge se računa prema izrazu:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{s}{100}\right), [^\circ], \quad (2.16)$$

gdje je:

s – nagib podloge, [%].

Tablica 2.6. Nagib podloge u postocima i stupnjevima

Postotak uspona	[%]	0	5	10	30
Kut uspona	[°]	0,0	2,9	5,7	16,7

Tablica 2.7. Otpori vožnje pri svladavanju uspona

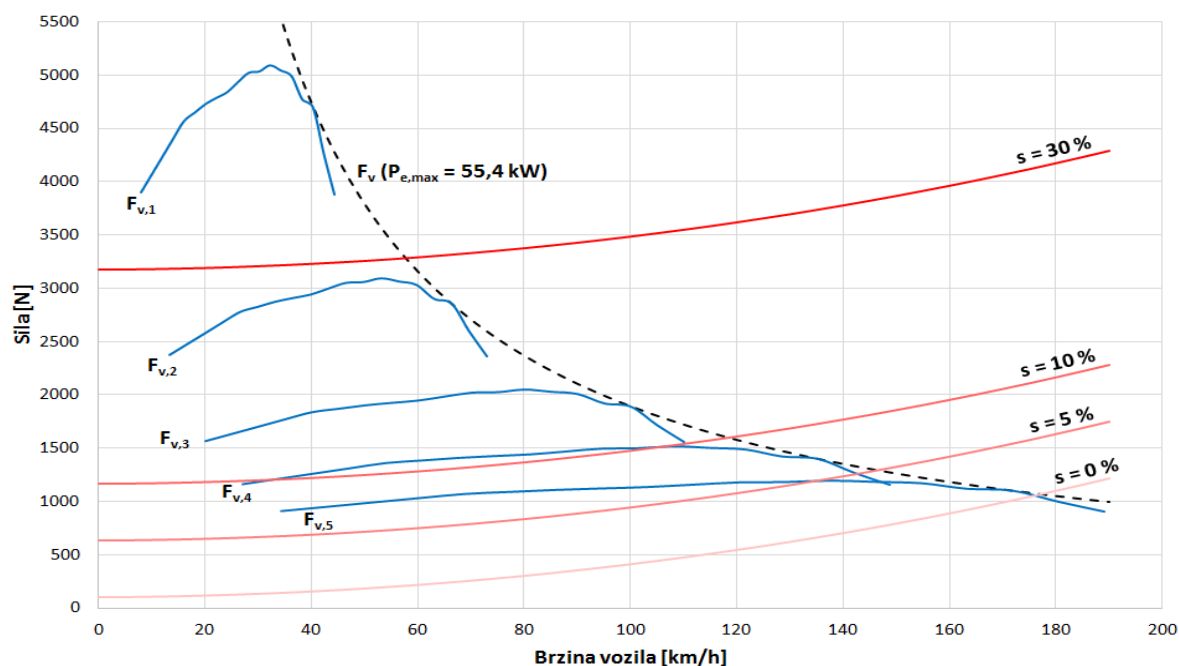
v [km/h]	$F_{k,0}$ [N]	$F_{k,5}$ [N]	$F_{k,10}$ [N]	$F_{k,30}$ [N]	$F_{u,0}$ [N]	$F_{u,5}$ [N]	$F_{u,10}$ [N]	$F_{u,30}$ [N]	F_z [N]	$F_{R,0}$ [N]	$F_{R,5}$ [N]	$F_{R,10}$ [N]	$F_{R,30}$ [N]
0	96,7	96,6	96,2	92,6	0,0	536,4	1068,9	3086,7	0,0	96,7	633,0	1165,1	3179,3
5	97,8	97,6	97,3	93,6	0,0	536,4	1068,9	3086,7	0,7	98,5	634,8	1166,8	3181,0
10	98,8	98,7	98,3	94,7	0,0	536,4	1068,9	3086,7	2,9	101,7	638,0	1170,1	3184,2
15	99,9	99,8	99,4	95,7	0,0	536,4	1068,9	3086,7	6,4	106,3	642,6	1174,7	3188,8
20	101,0	100,9	100,5	96,7	0,0	536,4	1068,9	3086,7	11,4	112,4	648,7	1180,8	3194,8
25	102,1	101,9	101,6	97,8	0,0	536,4	1068,9	3086,7	17,9	119,9	656,2	1188,3	3202,3
30	103,1	103,0	102,6	98,8	0,0	536,4	1068,9	3086,7	25,8	128,9	665,2	1197,3	3211,2
35	104,2	104,1	103,7	99,8	0,0	536,4	1068,9	3086,7	35,1	139,3	675,6	1207,6	3221,6
40	105,4	105,2	104,8	100,9	0,0	536,4	1068,9	3086,7	45,8	151,1	687,4	1219,5	3233,4
45	106,5	106,3	105,9	102,0	0,0	536,4	1068,9	3086,7	57,9	164,4	700,7	1232,8	3246,6
50	107,6	107,5	107,1	103,1	0,0	536,4	1068,9	3086,7	71,5	179,2	715,4	1247,5	3261,3
55	108,8	108,7	108,2	104,2	0,0	536,4	1068,9	3086,7	86,6	195,3	731,6	1263,7	3277,4
60	110,0	109,8	109,4	105,3	0,0	536,4	1068,9	3086,7	103,0	213,0	749,3	1281,3	3295,0

.
.
.
170	160,1	159,9	159,3	153,4	0,0	536,4	1068,9	3086,7	826,9	987,0	1523,3	2055,1	4067,0
175	164,5	164,3	163,7	157,6	0,0	536,4	1068,9	3086,7	876,3	1040,8	1577,0	2108,8	4120,5
180	169,2	169,0	168,3	162,0	0,0	536,4	1068,9	3086,7	927,1	1096,3	1632,5	2164,3	4175,8
185	174,2	174,0	173,3	166,8	0,0	536,4	1068,9	3086,7	979,3	1153,5	1689,7	2221,5	4232,8
190	179,5	179,3	178,6	171,9	0,0	536,4	1068,9	3086,7	1033,0	1212,4	1748,6	2280,4	4291,6

Ako se promotre podaci iz tablice 2.7. može se uočiti da otpor kotrljanja raste s porastom brzine, a razlog je porast faktora otpora kotrljanja f_k s porastom brzine. Također je vidljivo da otpor kotrljanja opada s porastom kuta uspona podloge čemu je uzrok smanjenje vrijednosti kosinusa kuta uspona.

Otpor uspona je konstantan obzirom na brzinu vožnje, a raste s porastom kuta uspona zbog porasta vrijednosti sinusa.

Otpor zraka raste s trećom potencijom brzine jer se pri proračunu ne uzima u obzir brzina protuvjetera.



Slika 2.6. Dijagram vučnih sila s ucrtanim otporima vožnje pri svladavanju uspona od 5, 10 i 30 %

Iz dijagrama je vidljivo da vozilo može svladati uspon od 30 % samo u prvom stupnju prijenosa. Uspon od 10 % moguće je svladati u četvrtom stupnju prijenosa, ali je preporučljivo koristiti niži stupanj prijenosa zbog smanjena opterećenja motora. Uspon od 5 % moguće je svladati u petom stupnju prijenosa.

2.3.2. Ubrzanje

Za proračun ubrzanja vozila koriste se izrazi (2.8), (2.9), (2.11) i (2.12). Otpor uspona je jednak nuki jer se proračun ubrzanja provodi na horizontalnoj podlozi. Izraz (2.12) se može zapisati i u obliku:

$$P_R = P_e \cdot \eta_m, [\text{kW}]. \quad (2.17)$$

Uvrštavanjem izraza (2.11) i (2.17) u (2.12) dobije se izraz:

$$P_e \cdot \eta_m = P_k + P_z + m \cdot k_m \cdot a \cdot v, \quad (2.18)$$

sređivanjem izraza (2.18) dobije se izraz za ubrzanje:

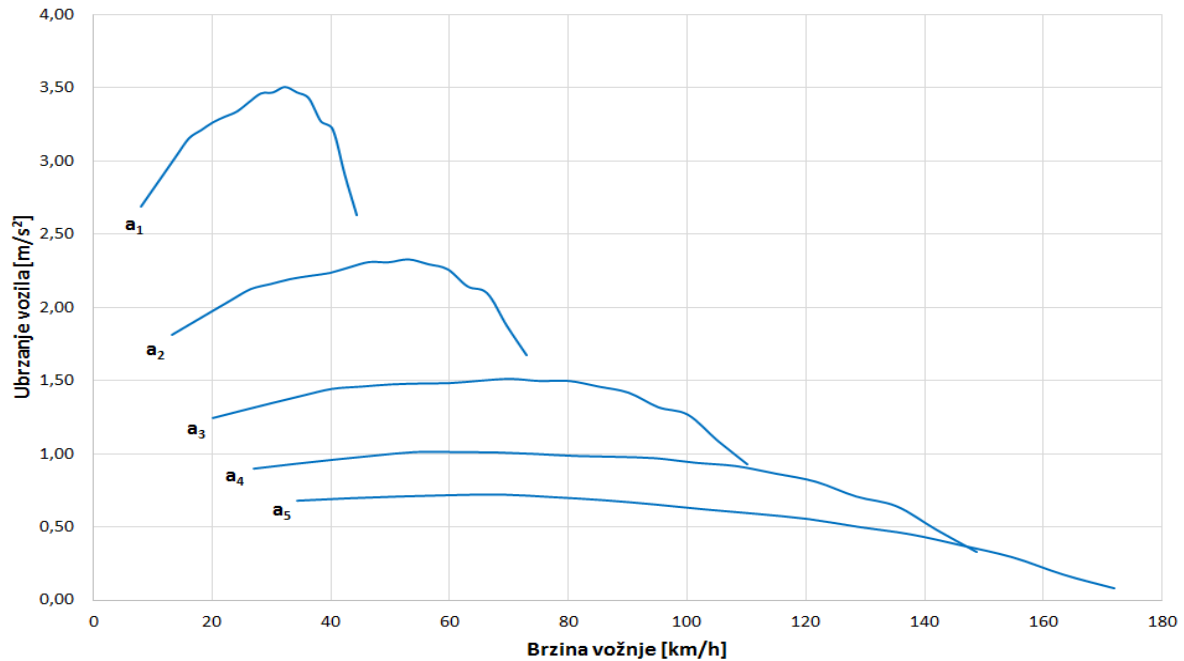
$$a = \frac{P_e \cdot \eta_m - P_k - P_z}{m_v \cdot k_m \cdot v}, [m/s^2]. \quad (2.19)$$

Vrijednosti efektivne snage motora se izračunava iz vrijednosti efektivnog momenta (tablica 2.5.) te će biti prikazane u tablici 2.8.

Tablica 2.8. Vrijednosti ubrzanja u pojedinim stupnjevima prijenosa

n [min^{-1}]	P_e [kW]	a_1 [m/s^2]	a_2 [m/s^2]	a_3 [m/s^2]	a_4 [m/s^2]	a_5 [m/s^2]
1000	9,19	2,69	1,82	1,24	0,90	0,68
1250	11,99	2,80	1,90	1,30	0,93	0,70
1500	14,99	2,92	1,97	1,35	0,96	0,71
1750	18,18	3,04	2,05	1,39	0,98	0,72
2000	21,55	3,16	2,13	1,44	1,01	0,72
2250	24,67	3,21	2,16	1,46	1,01	0,71
2500	27,88	3,27	2,20	1,47	1,01	0,69
2750	31,04	3,30	2,22	1,48	1,00	0,66
3000	34,24	3,34	2,24	1,48	0,98	0,62
3250	37,81	3,40	2,28	1,50	0,98	0,59
3500	41,45	3,46	2,31	1,51	0,97	0,56
3750	44,53	3,47	2,31	1,50	0,94	0,50
4000	48,05	3,51	2,33	1,49	0,91	0,45
4250	50,56	3,47	2,30	1,46	0,86	0,38
4500	52,97	3,43	2,26	1,42	0,81	0,30
4750	53,47	3,27	2,15	1,32	0,71	0,18
5000	55,40	3,22	2,10	1,27	0,64	0,08
5250	52,78	2,90	1,88	1,09	0,48	-0,09
5500	50,28	2,63	1,68	0,93	0,33	-0,26

Dvije negativne vrijednosti ubrzanja ukazuju na to da vozilo ne bi moglo postići brzinu koja bi se dobila računski pri tim brzinama vrtnje motora. Pri 5250 min^{-1} brzina u petom stupnju prijenosa iznosi $180,5 \text{ km/h}$, a pri 5500 min^{-1} iznosi $189,1 \text{ km/h}$ što je više od maksimalne brzine vozila koja iznosi oko 176 km/h prema proračunu, odnosno 173 km/h deklarirano.



Slika 2.7. Dijagram ubrzanja u pojedinom stupnju prijenosa

Iz dijagrama na slici 2.7. vidljivo je da se najveće vrijednosti ubrzanja postižu u prvom stupnju prijenosa te da vrijednosti opadaju svakim sljedećim stupnjem prijenosa.

Trajanje ubrzanja od 0 km/h do maksimalne brzine računa se prema izrazima:

$$t_{1,n=1000} = \frac{v_{1,n=1000}}{a_{1,n=1000}}, [s], \quad (2.20)$$

$$t_{1,n=1250} = t_{1,n=1000} + \frac{v_{1,n=1250} - v_{1,n=1000}}{a_{1,n=1000}}, [s], \quad (2.21)$$

$$t_{2,n=3250} = t_{1,n=5500} + \Delta t, [s], \quad (2.22)$$

gdje su:

$t_{1,n=1000}$ – vrijeme u prvom stupnju prijenosa pri brzini vrtnje motora 1000 min^{-1} , [s],

$v_{1,n=1000}$ – brzina u prvom stupnju prijenosa pri brzini vrtnje motora 1000 min^{-1} , [m/s],

$a_{1,n=1000}$ – ubrzanje u prvom stupnju prijenosa pri brzini vrtnje motora 1000 min^{-1} , [m/s^2],

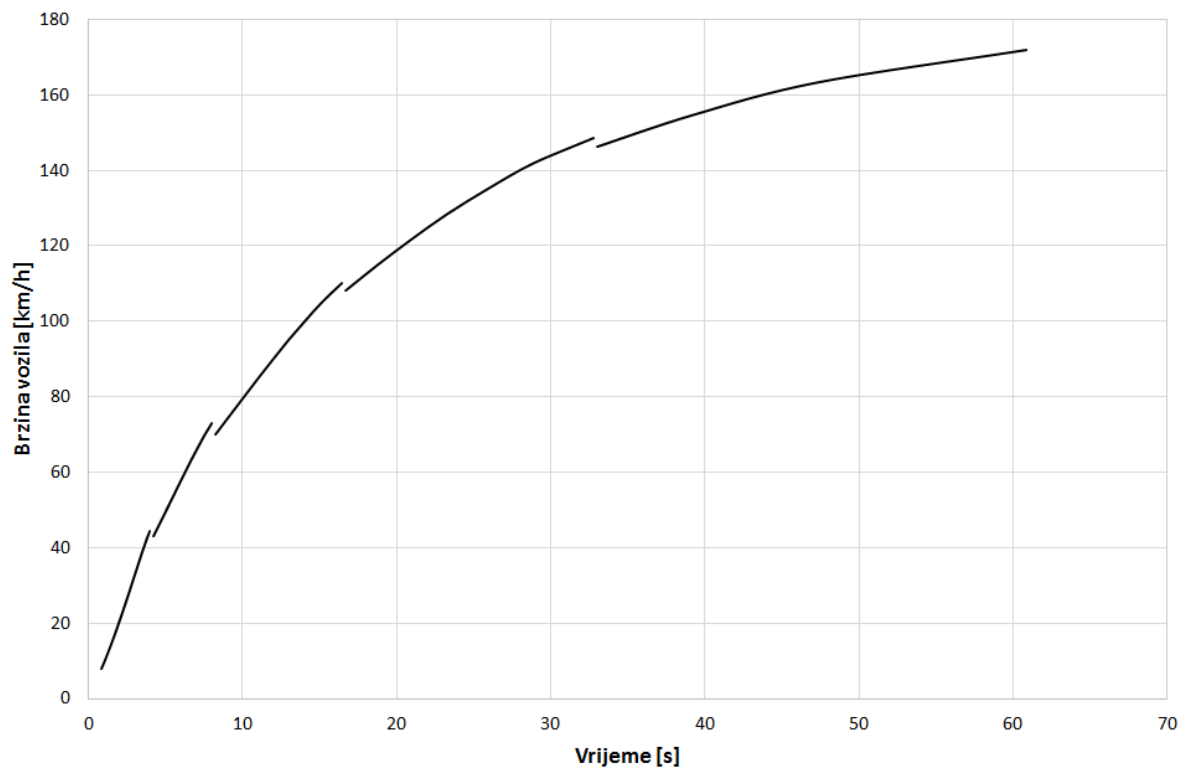
Δt – vrijeme potrebno za prebacivanje stupnja prijenosa = $0,25 \text{ s}$.

Oznake vrijede analogno za ostale stupnjeve prijenosa i brzine vrtnje motora.

Vrijednosti trajanja ubrzanja su prikazane u tablici 2.9, a prema njima je izrađen dijagram koji se nalazi na slici 2.8.

Tablica 2.9. Trajanje ubrzanja od 0 km/h do maksimalne brzine

n [min ⁻¹]	v_1 [km/h]	t_1 [s]	v_2 [km/h]	t_2 [s]	v_3 [km/h]	t_3 [s]	v_4 [km/h]	t_4 [s]	v_5 [km/h]	t_5 [s]
1000	8,1	0,83	13,3		20,0		27,0		34,4	
1250	10,1	1,04	16,6		25,0		33,8		43,0	
1500	12,1	1,24	19,9		30,1		40,6		51,6	
1750	14,1	1,43	23,2		35,1		47,3		60,2	
2000	16,1	1,62	26,5		40,1		54,1		68,8	
2250	18,2	1,80	29,8		45,1		60,8		77,4	
2500	20,2	1,97	33,2		50,1		67,6		86,0	
2750	22,2	2,14	36,5		55,1		74,4		94,6	
3000	24,2	2,31	39,8		60,1		81,1		103,1	
3250	26,2	2,48	43,1	4,24	65,1		87,9		111,7	
3500	28,3	2,65	46,4	4,65	70,1	8,26	94,6		120,3	
3750	30,3	2,81	49,7	5,05	75,1	9,18	101,4		128,9	
4000	32,3	2,97	53,0	5,44	80,1	10,11	108,2	16,66	137,5	
4250	34,3	3,13	56,4	5,84	85,2	11,04	114,9	18,72	146,1	33,01
4500	36,3	3,29	59,7	6,24	90,2	12,00	121,7	20,90	154,7	39,34
4750	38,3	3,45	63,0	6,65	95,2	12,98	128,4	23,23	163,3	47,40
5000	40,4	3,63	66,3	7,08	100,2	14,04	135,2	25,89	171,9	60,87
5250	42,4	3,80	69,6	7,52	105,2	15,13	142,0	28,83	180,5	
5500	44,4	3,99	72,9	8,01	110,2	16,41	148,7	32,76	189,1	



Slika 2.8. Dijagram trajanja ubrzanja od 0 km/h do maksimalne brzine

Iz tablice i dijagrama lako se očita da ubrzanje od 0 – 100 km/h traje 14 s, a do maksimalne brzine nešto više od 60 s.

Razlika između dekalriranog podataka (0 – 100 km/h, 12,0 s) i vrijednosti trajanja ubrzanja od 0 – 100 km/h je nastala zbog razlika između podataka koje posjeduje proizvođač i podataka koji su dostupni javnosti te zbog nekih pojednostavljenja i aproksimacija u vidu faktora otpora kotrljanja f_k i faktora rotirajućih masa k_m .

3. KOMPONENTE ELEKTRIČNOG VOZILA



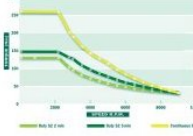

3.1. Elektromotor

Za pogon električnih vozila koriste se elektromotori koji se mogu podijeliti u dvije velike skupine, izmjenične i istosmjerne električne motore. Prednost istosmjernih elektromotora je vrlo jednostavna regulacija brzine vrtnje i povoljnija momentna karakteristika. Glavni nedostaci istosmjernih motora su niža pouzdanost, niži stupanj iskoristivosti te zahtjevi za određenu razinu održavanja.

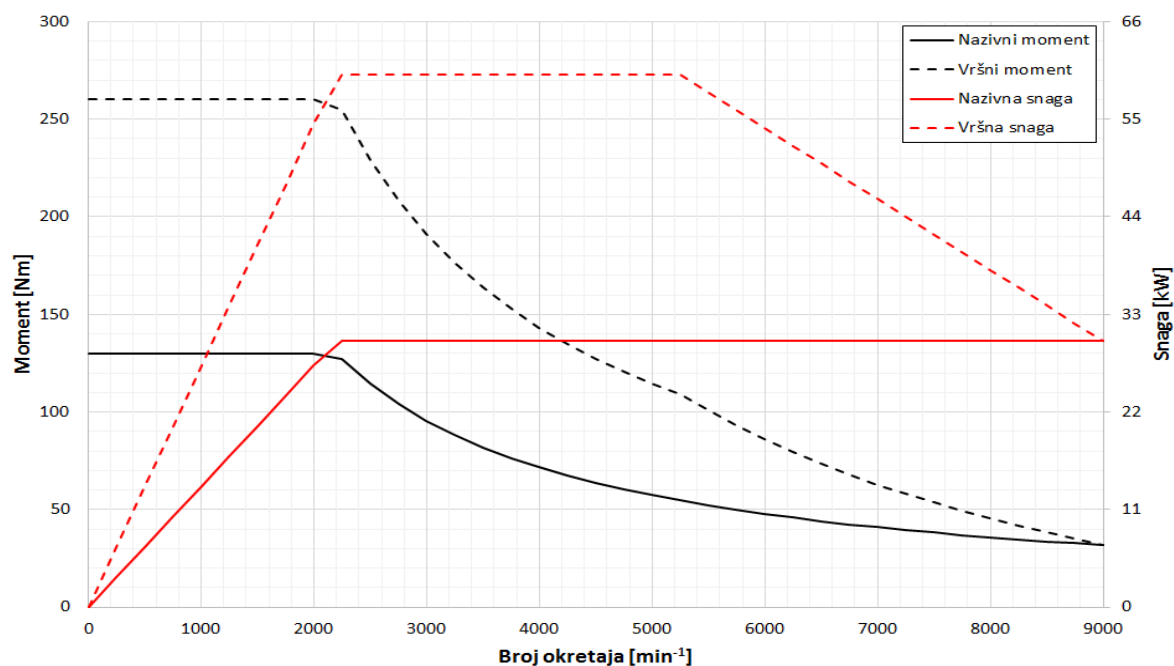
Izmjenični motori se uglavnom upotrebljavaju u električnim vozilima zbog vrlo visoke iskoristivosti, vrlo precizne regulacije brzine vrtnje, lakšeg ostvarivanja regenerativnog kočenja te gotovo zanemarive razine održavanja u odnosu na istosmjerne elektromotore. Mana su im visoki troškovi proizvodnje (ne vrijedi za sve vrste izmjeničnih elektromotora, npr. asinkroni kavezni motori su najjeftiniji elektromotori za proizvodnju po jedinici snage) te visoka cijena uređaja za upravljanje brzinom vrtnje, odnosno kontrolera.

Elektromotor odabran za ovu preradu je trofazni izmjenični asinkroni kavezni elektromotor od tvrtke Ansaldo. Razlozi za odabir ovog motora su:

1. Nazivna snaga od 30 kW. Kao što je već navedeno u prethodnom poglavlju najviša vrijednost snage potrebne za savladavanje otpora je oko 33 kW. Također je spomenuta razlika u deklariranju snage kod EM i MSUI. Ovaj motor je sposoban isporučiti snagu od 60 kW u trajanju do 2 minute što ga čini idealnim odabirom za ovu preradu.
2. Nazivni moment od 130 Nm. Jedan od zahtjeva je zadržavanje postojećih performansi vozila, a deklarirani moment Ottovog motora je 126 Nm. Kao i kod snage, razlikujemo nazivni i vršni moment EM, a kod ovog EM vršni moment iznosi 260 Nm što je više od dvostruko u odnosu na Ottov motor.
3. Područje iskoristive brzine vrtnje okretaja od 0 – 9000 min⁻¹. Tako široko područje omogućuje postavljanje radnih točki u područja s višim stupnjem iskoristivosti elektromotora kako bi se dobila niža potrošnja električne energije. Nije pravilo, ali elektromotori obično imaju viši stupanj iskoristivosti na višim brzinama vrtnje.
4. Vodeno hlađenje motora. Ova opcija pruža više mogućnosti reguliranja temperature EM za razliku od hlađenja ventilatorom spojenim na osovinu EM. Također postoji mogućnost grijanja putničkog prostora rashladnom tekućinom motora u kombinaciji s električnim grijačem.
5. Uz EM dolazi odgovarajući kontroler koji je programiran za upotrebu EM kao pogonskog stroja za električno vozilo. To omogućava bolju kontrolu odziva gasa, odnosno uglađeniju vožnju pogotovo pri pokretanju vozila.

MOTOR			INVERTER		
	Type	squirrel cage induction		Type	IGBT
	N. of phase	3		Voltage Range	150 V - 380V
	Pole number	4		Max DC current	350 A
	Rated torque	130 Nm		Max DC current	350 A
	Max torque at 2200 rpm	260 Nm		Modulation	PWM
	Max speed	10,000 rpm		Max frequency	400 Hz
	Rated power (ECE 85)	40 kW		Switching frequency	4 kHz
	Peak power 2'	60 kW		Control	microprocessor
	Degree of protection	IP 56		Degree of protection	IP56
	Dimensions (L x A")	440 x 240 mm		Dimensions	430 x 340 x 152 (h) mm
	Weight	80 kg		Weight	14 kg

Slika 3.1. Ansaldo elektromotor i kontroler [20]



Slika 3.2. Karakteristika momenta i snage elektromotora

3.2. Pretvarač napona i frekvencije

Zadaća pretvarača je regulacija brzine vrtnje i snage električne energije koja se isporučuje elektromotoru u odnosu na položaj pedale gasa. Regulacija je izvedena pulsno-širinskom modulacijom (*engl. pulse-width modulation, PWM*). Pulsno-širinska modulacija generira sinusni oblik napona regulacijom duljine trajanja istosmjernog napona. Modulacijom se

oponaša sklopka, uključuje se i isključuje istosmjerni izvor (baterija) kako bi se generirao sinusni oblik napona. Oblik i frekvencija dobivenog napona ovise o duljini trajanja impulsa.

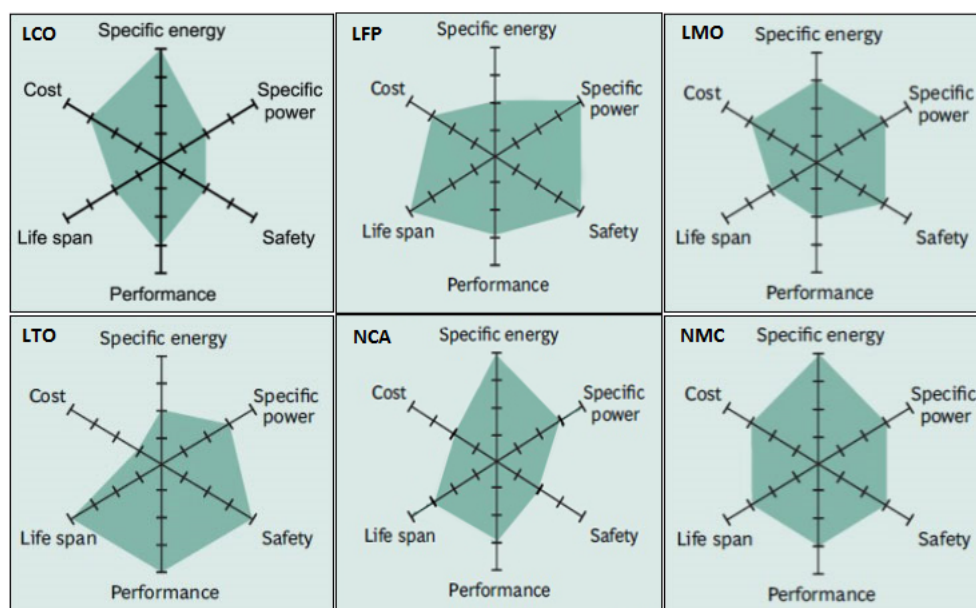
3.3. Baterije

U pogonskom sustavu suvremenih električnih vozila najčešće se koriste litij ionske baterije (*engl. Lithium ion* – Li-ion) koje su istisnule nikal-metal-hidridne baterije (*engl. Nickel Metal Hydride* – NiMH).

Glavne značajke Li-ionskih baterija su povećan kapacitet u odnosu na NiMH, bez memorijskog efekta, duži vijek trajanja, veći broj ciklusa punjenja i pražnjenja, veća specifična energija i specifična snaga.

Postoje tri oblika u kojima se proizvode Li-ionske baterije, cilindrične, prizmatične i vrećice (*engl. pouch cell*). Prednost cilindričnih je mehanička stabilnost, tj. ne dolazi do značajnih deformacija kućišta tijekom punjenja i pražnjenja, te ekonomična proizvodnja. Nedostatak im je neefikasno ispunjavanje prostora zbog cilindričnog oblika. Prizmatične za razliku od cilindričnih odlično ispunjavaju prostor, ali je cijena proizvodnje viša. Prednosti vrećica su ekonomična proizvodnja te lagano i fleksibilno kućište. Nedostatak je bubrenje prilikom punjenja zbog nastanka plina unutar baterije [21].

Li-ionske baterije mogu se podijeliti prema materijalu od kojeg se izrađuje katoda, pa tako postoje litij-kobalt-oksidi (*engl. Lithium Cobalt Oxide*, LiCoO_2 , LCO), litij-mangan-oksidi (*engl. Lithium Manganese Oxide*, LiMn_2O_4 , LMO), litij-nikal-mangan-kobalt-oksidi (*engl. Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide*, LiNiMnCoO_2 , NMC), litij-željezni-fosfat (*engl. Lithium Iron Phosphate*, LiFePO_4 , LFP), litij-nikal-kobalt-aluminij-oksidi (*engl. Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide*, LiNiCoAlO_2 , NCA) i litij-titan-oksidi (*engl. Lithium Titanate* $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, LTO) [22].



Slika 3.3. Karakteristike Li-ionskih baterija [22]

Na slici 3.3. su prikazane karakteristike Li-ionskih baterija. Specifična energija (*engl. specific energy*) je omjer električne energije koju baterija može pohraniti po jedinici mase. Specifična snaga (*engl. specific power*) je omjer snage koju baterija može isporučiti po jedinici mase. Pod sigurnošću (*engl. safety*) se smatra sigurnost prilikom punjenja, pražnjenja i skladištenja. Temperaturno područje je raspon temperature u kojem baterije normalno rade (*engl. performance* – izvođenje, učinak, svojstva, ali ovdje predstavlja temperaturno područje). Vijek trajanja, broj ciklusa punjenja i pražnjenja (*engl. life span*) se nastoji učiniti što većim. Cijena (*engl. cost*) se nastoji smanjiti.

Za prerađu su odabrane cilindrične baterije Panasonic NCR18650B. Osnovne karakteristike baterije se nalaze na slici 3.4., a ostale u prilogu na kraju rada.

Specifications

Rated capacity ⁽¹⁾	Min. 3200mAh
Capacity ⁽²⁾	Min. 3250mAh Typ. 3350mAh
Nominal voltage	3.6V
Charging	CC-CV, Std. 1625mA, 4.20V, 4.0 hrs
Weight (max.)	48.5 g
Temperature	Charge*: 0 to +45°C Discharge: -20 to +60°C Storage: -20 to +50°C
Energy density ⁽³⁾	Volumetric: 676 Wh/l Gravimetric: 243 Wh/kg

⁽¹⁾ At 20°C ⁽²⁾ At 25°C ⁽³⁾ Energy density based on bare cell dimensions

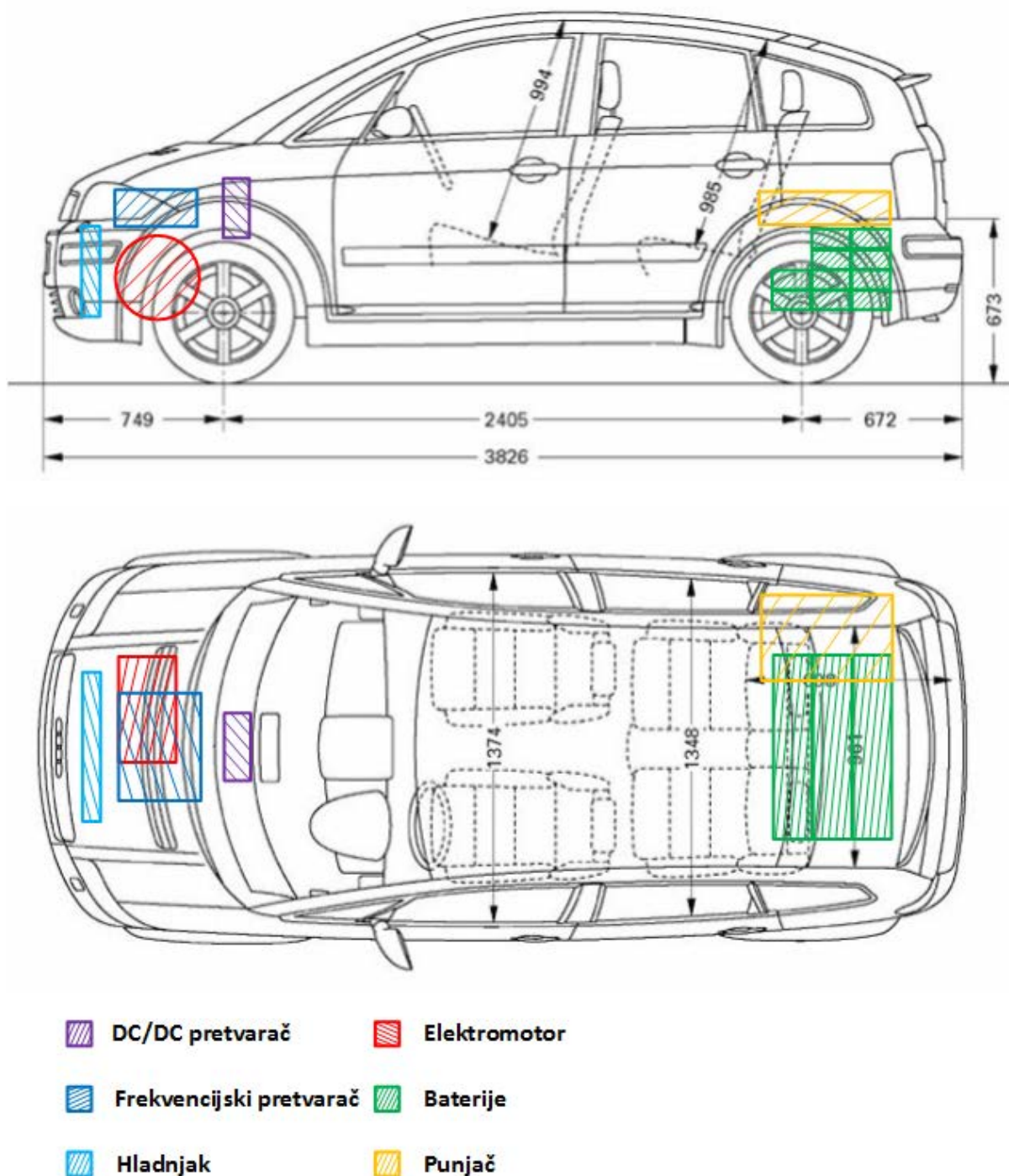
Slika 3.4. Karakteristike baterije Panasonic NCR18650B [23]

3.4. Ostale komponente

Osim navedenih komponenti, elektromotora, baterija i pretvarača napona i frekvencije, za ispravno funkcioniranje električnog vozila potrebni su još neki uređaji. Za punjenje baterija potreban je punjač čija se snaga, napon i tehnologija punjenja moraju prilagoditi baterijskom paketu koji će se koristiti u vozilu. Za kontrolu napona, temperature i struje punjenja/pražnjenja baterija koristi se BMS (*engl. battery management system*). Korištenjem BMS-a se osigurava rad baterija u optimalnom području u kojem neće doći do pretjeranog trošenja ili oštećenja. Za električne instalacije vozila treba osigurati izvor napajanja od 12 V (svijetla, pokazivači smjera, brzinomjer, ABS...), a to se može izvesti ili dodatnim akumulatorom ili DC/DC pretvaračem odgovarajuće snage. Za grijanje putničkog prostora i odmrzavanje vjetrobranskog stakla potrebno je imati električni grijač odgovarajuće snage.

3.5. Raspored komponenti električnog pogona u vozilu

Raspored komponenti električnog sustava je napravljen tako da se očuva, što je bolje moguće, omjer raspodjele mase po osovina. Obzirom da su komponente vrlo nisko postavljene, nije previše narušen položaj težišta, a time ni dinamičke karakteristike. Komponente su podijeljene tako da nešto manje od pola mase komponenata opterećuje prednju, a ostatak mase stražnju osovину. Na slici 3.5. je prikazan zamišljeni raspored komponenti električnog sustava.



Slika 3.5. Prikaz rasporeda komponenti električnog pogona

Motor je postavljen poprečno sprijeda, na mjesto Ottovog motora, te je spojen na mjenjač. Ovakvo rješenje je najjednostavnije izvedivo jer nije potrebno raditi nikakve preinake na sustavu ovjesa i upravljanja. Ugradnja motora u prednje kotače bi potencijalno bila vrlo komplicirana za izvođenje zbog brojnih preinaka koje bi se morale izvesti na elementima ovjesa, a uz to smanjuje udobnost vožnje zbog povećanja neovješanih masa.

Frekvencijski pretvarač i hladnjak rashladne tekućine smješteni su u neposrednoj blizini elektromotora kako bi se smanjila potrebna duljina vodiča, odnosno cijevi za prijenos rashladne tekućine. DC/DC pretvarač smješten je u motornom prostoru zato što se velika većina električnih instalacija nalazi upravo tamo.

Zbog odabira baterijskih članaka tvrtke Panasonic NCR18650B moguće je veličinu i oblik modula prilagođavati raspoloživom prostoru. Baterije su smještene u prtljažniku na mjestu akumulatora, te na mjestu ispušnog lonca i spremnika goriva.

Punjač je smješten u prtljažniku kako bi se nalazio što bliže otvoru za točenje goriva koji je iskorišten za smještaj priključka za punjenje. Time će se duljina potrebnih vodiča za spajanje punjača i priključka za punjenje te punjača i baterije svesti na minimum.

Tablica 3.1. Mase pojedinih komponenti električnog sustava

Elektromotor	80 kg
Frekvencijski pretvarač	14 kg
Hladnjak motora	10 kg
Punjač i DC/DC pretvarač	22 kg
Baterija	160 kg
Vodiči, instrumenti, sklopke	60 kg
Ukupno	346 kg

Treba napomenuti da su neke mase pretpostavljene, a neke preuzete iz kataloga.

4. PRORAČUN OTPORA VOŽNJE I PERFORMANSI ELEKTRIČNOG VOZILA

Za analizu energetske potrebe potrebno je provesti proračun otpora vožnje, a zatim se može izračunati potrebna snaga. Potrošnja električne energije izračunat će se nakon proračuna potrebne snage.

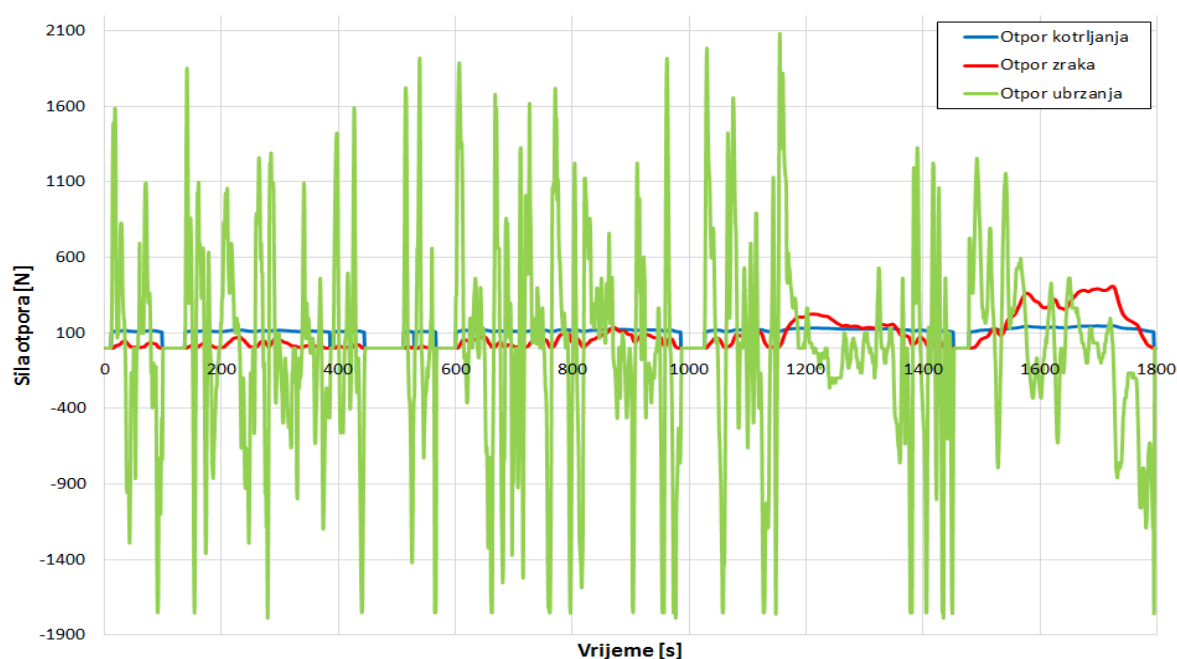
4.1. Otpori vožnje i potrebne snage za električno vozilo

Za proračun otpora koristit će se izrazi, uvjeti i pretpostavke koje su već korištene u poglavlju 2.2. Otpori vožnje i potrebne snage.

Podaci o vozilu potrebni za izračunavanje otpora vožnje dani su u

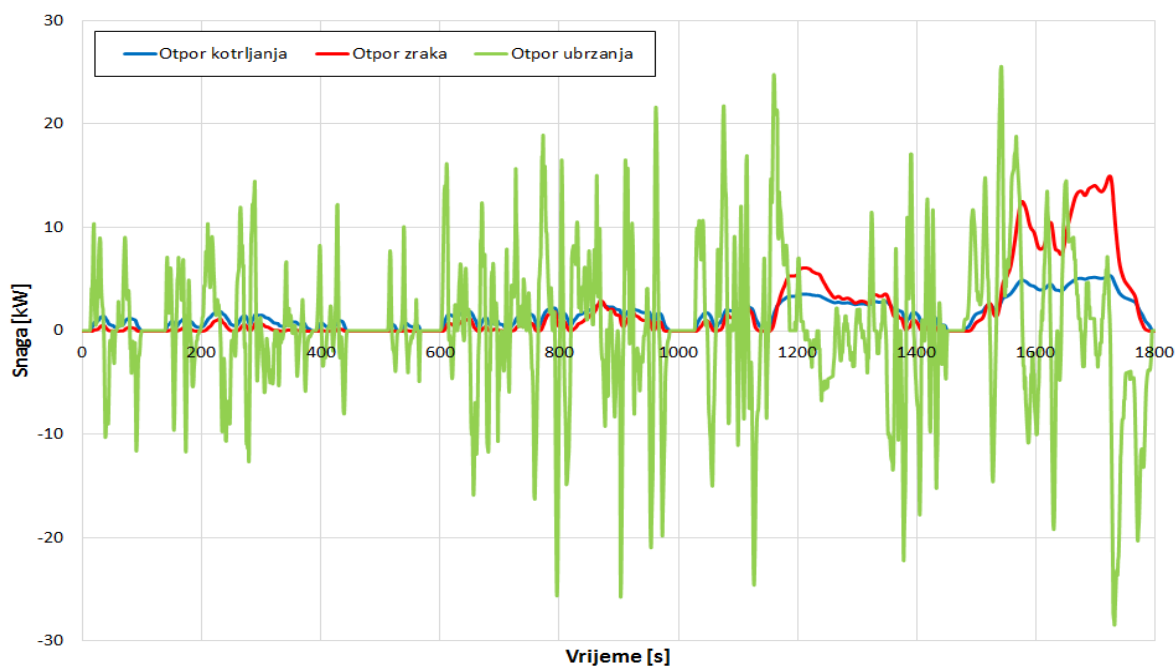
Tablica 4.1. Podaci o vozilu potrebni za izračunavanje otpora vožnje električnog vozila

Masa praznog vozila, m_v	[kg]	895
Masa vozila bez pogonskog sustava, m_0	[kg]	645
Masa tereta, m_t	[kg]	200
Masa komponenti MSUI, m_{MSUI}	[kg]	250
Masa komponenti el. pogonskog sustava, m_{es}	[kg]	346
Ukupna masa, m	[kg]	1191
Stupanj korisnosti od baterije do kotača, η_{ev}	[-]	0,7
Stupanj korisnosti baterije i punjača, $\eta_{b,p}$	[-]	0,76



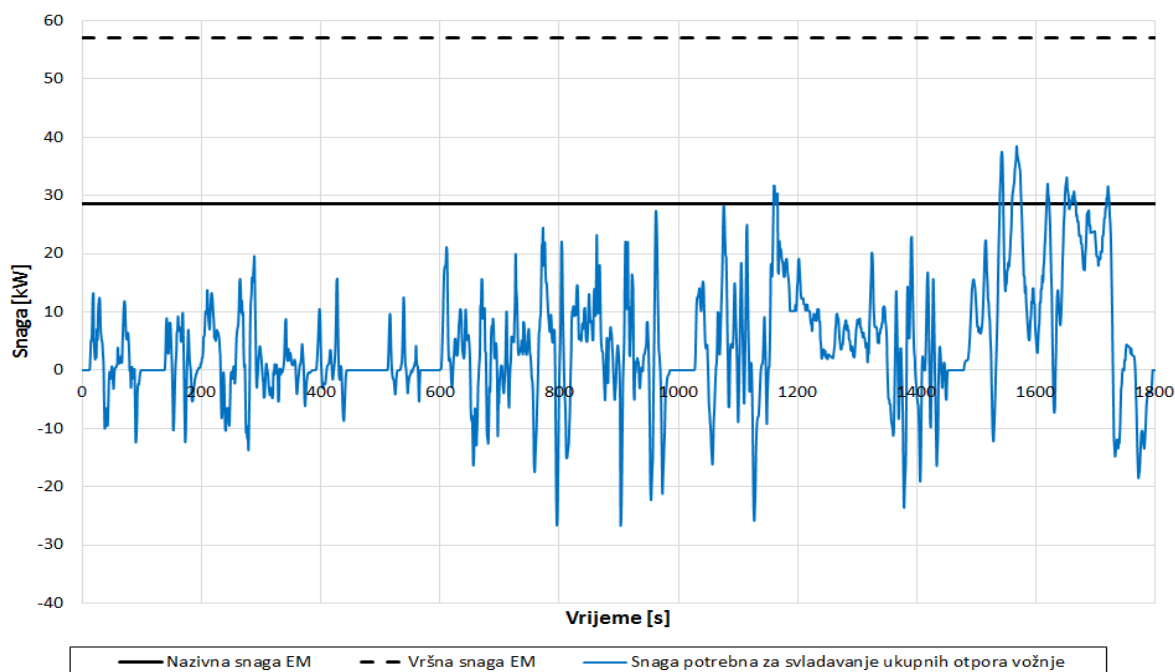
Slika 4.1. Sile pojedinih otpora vožnje električnog vozila

Uspoređujući sliku 2.3. i sliku 4.1. uočava se da su sile otpora kod električnog vozila nešto veće zbog povećanja mase vozila u iznosu oko 100 kg.



Slika 4.2. Snaga potrebne za svladavanje pojedinih otpora vožnje električnog vozila

Do istog zaključka se može doći uspoređujući sliku 2.4. i sliku 4.2. Potrebna snaga je nešto veća kod električnog vozila zbog veće mase.



Slika 4.3. Dijagram snage potrebne za svladavanje ukupnih otpora vožnje

Iz dijagrama na slici 4.3. može se vidjeti da potrebna snaga pogonskog motora prelazi nazivnu snagu odabranog elektromotora umanjenu za stupanj korisnosti u Extra-High fazi u kojoj se postižu brzine preko 120 km/h uz visoka ubrzanja. Međutim to neće uzrokovati pregrijavanje motora jer se radi o nekoliko kratkotrajnih vršnih vrijednosti u ukupnom trajanju od svega 53 s.

4.2. Proračun performansi električnog vozila

Proračun performansi električnog vozila proveden je kao i u poglavlju 2.3. te su u nastavku prikazani samo rezultati u tablicama i dijagramima.

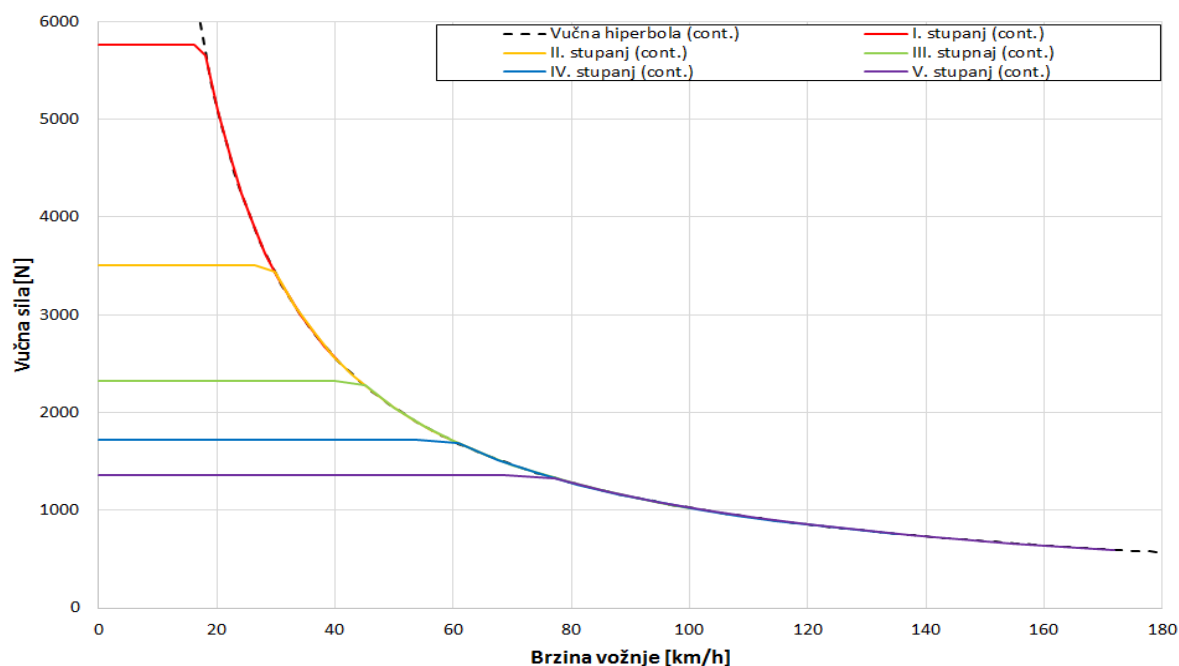
4.2.1. Vučni dijagram

Prvo je u tablici 4.2. prikazan iznos vučnih sila u ovisnosti o brzini vožnje u pojedinim stupnjevima prijenosa te moment motora za nazivnu snagu motora, a u tablici 4.3 prikazat će se isti podaci za vršnu snagu motora.

Tablica 4.2. Vučne sile, brzine i momenti motora električnog vozila pri nazivnoj snazi

n [min ⁻¹]	M_e [Nm]	v_1 [km/h]	F_{v1} [N]	v_2 [km/h]	F_{v2} [N]	v_3 [km/h]	F_{v3} [N]	v_4 [km/h]	F_{v4} [N]	v_5 [km/h]	F_{v5} [N]
0	130	0	5768	0	3511	0	2324	0	1722	0	1354
250	130	2	5768	3	3511	5	2324	7	1722	9	1354
500	130	4	5768	7	3511	10	2324	14	1722	17	1354
750	130	6	5768	10	3511	15	2324	20	1722	26	1354
1000	130	8	5768	13	3511	20	2324	27	1722	34	1354
1250	130	10	5768	17	3511	25	2324	34	1722	43	1354
1500	130	12	5768	20	3511	30	2324	41	1722	52	1354
1750	130	14	5768	23	3511	35	2324	47	1722	60	1354
2000	130	16	5768	27	3511	40	2324	54	1722	69	1354
2250	127	18	5649	30	3438	45	2276	61	1686	77	1326
2500	115	20	5084	33	3095	50	2048	68	1518	86	1194
2750	104	22	4622	36	2813	55	1862	74	1380	95	1085
3000	95	24	4237	40	2579	60	1707	81	1265	103	995
3250	88	26	3911	43	2380	65	1576	88	1168	112	918
3500	82	28	3631	46	2210	70	1463	95	1084	120	853
3750	76	30	3389	50	2063	75	1366	101	1012	129	796
4000	72	32	3177	53	1934	80	1280	108	949	138	746
4250	67	34	2991	56	1820	85	1205	115	893	146	702
4500	64	36	2824	60	1719	90	1138	122	843	155	663
4750	60	38	2676	63	1629	95	1078	128	799	163	628
5000	57	40	2542	66	1547	100	1024	135	759	172	597

Radi lakšeg pregleda podataka izrađen je dijagram vučnih sila koji je prikazan na slici 4.4.



Slika 4.4. Dijagram vučnih sila elektromotora pri nazivnoj snazi

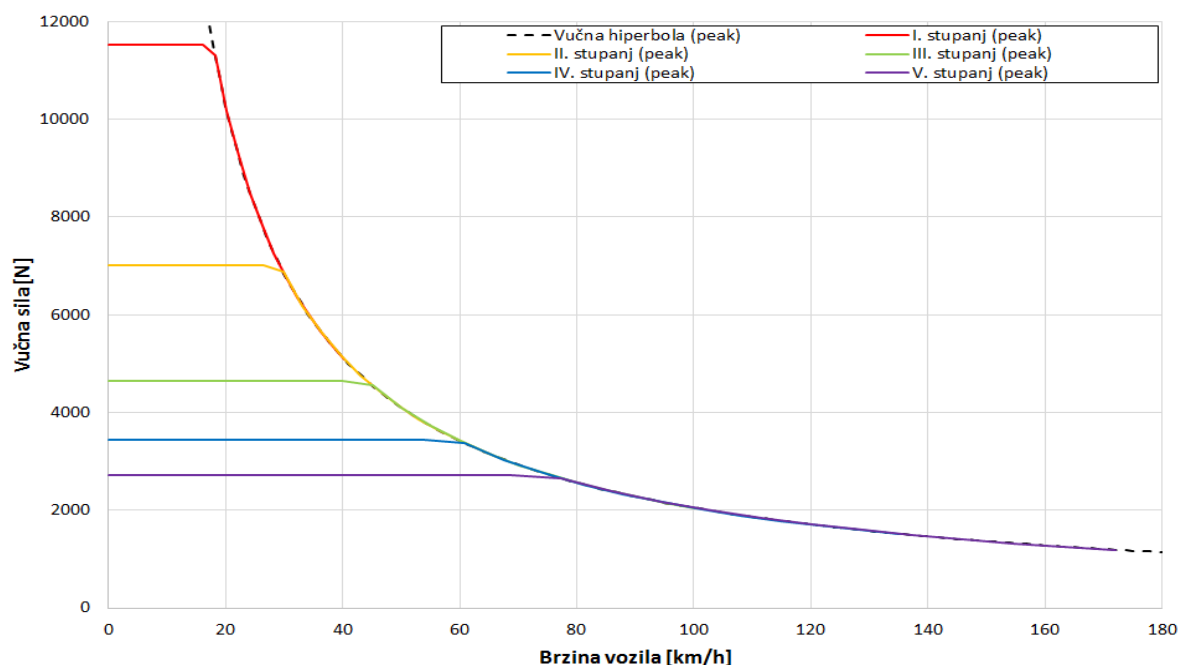
Na slici 4.4. se jasno vidi da krivulja vučne sile u pojedinom stupnju prijenosa prati oblik vučne hiperbole koja opisuje idealne vučne karakteristike pogonskog uređaja. Mora se uzeti u obzir da su krivulje vučnih sila izračunate na temelju „ispeglanih“ krivulja momenta i snage elektromotora. U realnoj upotrebi će postojati oscilacije krivulja vučnih sile te one neće pratiti oblik vučne hiperbole kao na slici, ali će neiskorišteno područje biti znatno manje u odnosu na motor s unutarnjim izgaranjem.

Tablica 4.3. Vučne sile, brzine i momenti motora električnog vozila pri vršnoj snazi

n [min ⁻¹]	M_e [Nm]	v_1 [km/h]	F_{v1} [N]	v_2 [km/h]	F_{v2} [N]	v_3 [km/h]	F_{v3} [N]	v_4 [km/h]	F_{v4} [N]	v_5 [km/h]	F_{v5} [N]
0	260	0	11535	0	7021	0	4647	0	3444	0	2708
250	260	2	11535	3	7021	5	4647	7	3444	9	2708
500	260	4	11535	7	7021	10	4647	14	3444	17	2708
750	260	6	11535	10	7021	15	4647	20	3444	26	2708
1000	260	8	11535	13	7021	20	4647	27	3444	34	2708
1250	260	10	11535	17	7021	25	4647	34	3444	43	2708
1500	260	12	11535	20	7021	30	4647	41	3444	52	2708
1750	260	14	11535	23	7021	35	4647	47	3444	60	2708
2000	260	16	11535	27	7021	40	4647	54	3444	69	2708
2250	255	18	11298	30	6877	45	4552	61	3373	77	2652
2500	229	20	10168	33	6189	50	4097	68	3036	86	2387

2750	208	22	9243	36	5626	55	3724	74	2760	95	2170
3000	191	24	8473	40	5158	60	3414	81	2530	103	1989
3250	176	26	7821	43	4761	65	3151	88	2335	112	1836
3500	164	28	7263	46	4421	70	2926	95	2168	120	1705
3750	153	30	6779	50	4126	75	2731	101	2024	129	1591
4000	143	32	6355	53	3868	80	2560	108	1897	138	1492
4250	135	34	5981	56	3641	85	2410	115	1786	146	1404
4500	127	36	5649	60	3438	90	2276	122	1686	155	1326
4750	121	38	5351	63	3257	95	2156	128	1598	163	1256
5000	115	40	5084	66	3095	100	2048	135	1518	172	1194

Radi lakšeg pregleda podataka izrađen je dijagram vučnih sila koji je prikazan na slici 4.5.



Slika 4.5. Dijagram vučnih sila elektromotora pri vršnoj snazi

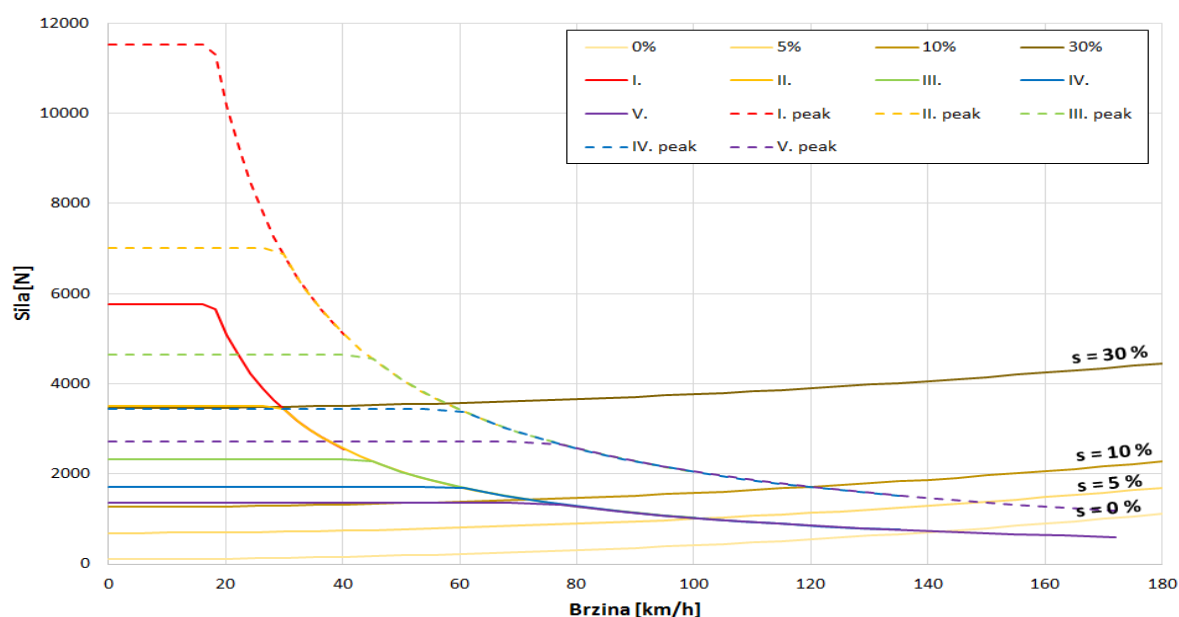
Slika 4.5. je oblikom ista kao i slika 4.4., ali je iznos vučne sile veći zbog veće snage motora, 60 u odnosu na 30 kW.

Da bi se provjerila mogućnost svladavanja uspona podloge od 5, 10 i 30 % uz konstantnu brzinu vožnje koristit će se izrazi koji su korišteni i kod proračuna vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem.

Podaci o otporima vožnje pri usponima od 5, 10 i 30 % uz konstantnu brzinu dani su u tablici 4.4.

Tablica 4.4. Otpori vožnje električnog vozila pri svladavanju uspona

v [km/h]	$F_{k,0}$ [N]	$F_{k,5}$ [N]	$F_{k,10}$ [N]	$F_{k,30}$ [N]	$F_{u,0}$ [N]	$F_{u,5}$ [N]	$F_{u,10}$ [N]	$F_{u,30}$ [N]	F_z [N]	$F_{R,0}$ [N]	$F_{R,5}$ [N]	$F_{R,10}$ [N]	$F_{R,30}$ [N]
0	105,2	105,0	104,6	100,7	0,0	583,5	1162,6	3357,3	0,0	105,2	688,5	1267,2	3458,0
5	106,3	106,2	105,8	101,8	0,0	583,5	1162,6	3357,3	0,7	107,0	690,4	1269,1	3459,8
10	107,5	107,4	107,0	103,0	0,0	583,5	1162,6	3357,3	2,9	110,4	693,7	1272,4	3463,1
15	108,7	108,5	108,1	104,1	0,0	583,5	1162,6	3357,3	6,4	115,1	698,4	1277,1	3467,8
20	109,8	109,7	109,3	105,2	0,0	583,5	1162,6	3357,3	11,4	121,3	704,6	1283,3	3473,9
25	111,0	110,9	110,5	106,3	0,0	583,5	1162,6	3357,3	17,9	128,9	712,2	1290,9	3481,5
30	112,2	112,1	111,6	107,5	0,0	583,5	1162,6	3357,3	25,8	137,9	721,3	1300,0	3490,5
35	113,4	113,2	112,8	108,6	0,0	583,5	1162,6	3357,3	35,1	148,4	731,8	1310,4	3500,9
40	114,6	114,4	114,0	109,8	0,0	583,5	1162,6	3357,3	45,8	160,4	743,7	1322,4	3512,8
45	115,8	115,7	115,2	110,9	0,0	583,5	1162,6	3357,3	57,9	173,8	757,1	1335,8	3526,2
50	117,1	116,9	116,5	112,1	0,0	583,5	1162,6	3357,3	71,5	188,6	771,9	1350,6	3540,9
55	118,3	118,2	117,7	113,3	0,0	583,5	1162,6	3357,3	86,6	204,9	788,2	1366,9	3557,2
60	119,6	119,5	119,0	114,6	0,0	583,5	1162,6	3357,3	103,0	222,6	805,9	1384,6	3574,9
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
160	165,5	165,3	164,7	158,5	0,0	583,5	1162,6	3357,3	732,5	898,0	1481,3	2059,8	4248,3
165	169,7	169,5	168,8	162,5	0,0	583,5	1162,6	3357,3	779,0	948,7	1531,9	2110,4	4298,8
170	174,2	173,9	173,3	166,8	0,0	583,5	1162,6	3357,3	826,9	1001,1	1584,3	2162,8	4351,0
175	178,9	178,7	178,0	171,4	0,0	583,5	1162,6	3357,3	876,3	1055,2	1638,4	2216,9	4405,0
180	184,0	183,8	183,1	176,2	0,0	583,5	1162,6	3357,3	927,1	1111,1	1694,3	2272,7	4460,6



Slika 4.6. Dijagram vučnih sila električnog vozila s ucertanim otporima vožnje pri svladavanju uspona od 5, 10 i 30 %

Iz dijagrama na slici 4.6. vidljivo je da vozilo može svladati uspon od 30 % u prvom stupnju prijenosa pri nazivnoj snazi, dok pri vršnoj snazi može isti uspon svladati i u trećem stupnju prijenosa. Uspon od 10 % može se svladati u petom stupnju prijenosa pri nazivnoj snazi do brzine od oko 50 km/h.

4.2.2. Ubrzanje električnog vozila

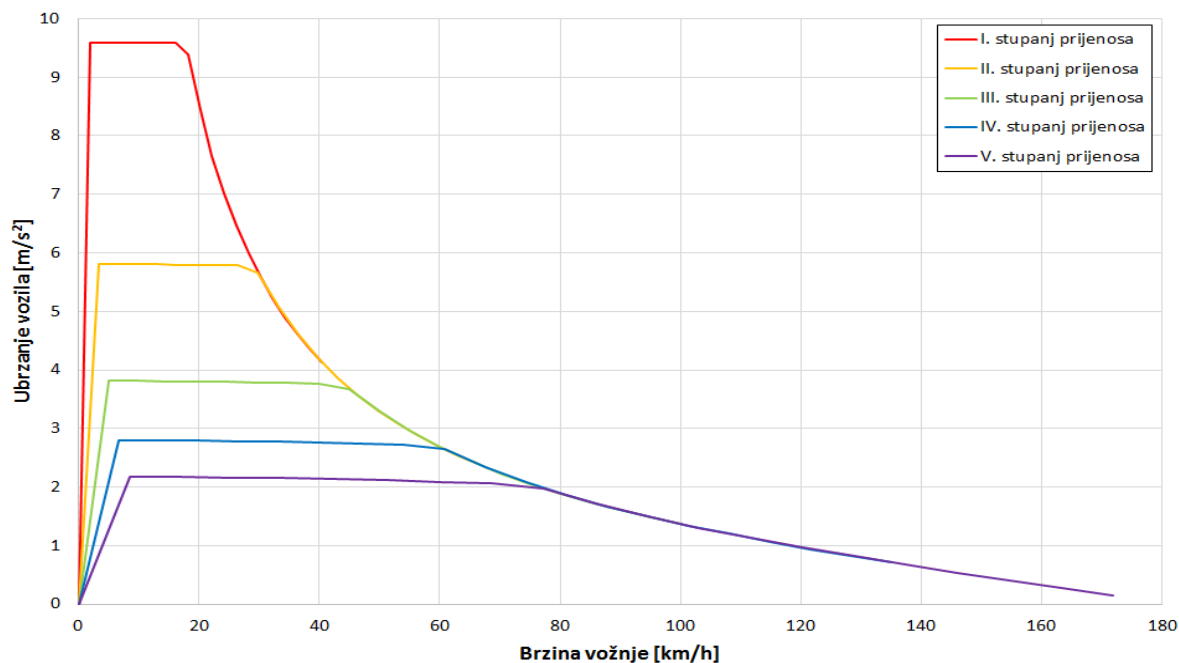
Proračun ubrzanja proveden je na isti način kao i u poglavlju 2.3.2. te su u nastavku prikazani samo rezultati u tablicama i dijagramima.

Za proračun ubrzanja su korištene vrijednosti vršne snage i momenta. Nakon provedenog proračuna utvrđeno je da do pregrijavanja motora ne bi trebalo doći jer je trajanje ubrzanja do maksimalne brzine kraće od dvije minute. Prema podacima od proizvođača vršna snaga se može isporučivati u trajanju do dvije minute.

U tablici 4.5. prikazani su iznosi ubrzanja u pojedinim stupnjevima prijenosa.

Tablica 4.5. Ubrzanja u pojedinim stupnjevima prijenosa

n [min ⁻¹]	P_e [kW]	a_1 [m/s ²]	a_2 [m/s ²]	a_3 [m/s ²]	a_4 [m/s ²]	a_5 [m/s ²]
0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
250	6,8	9,60	5,81	3,81	2,80	2,18
500	13,6	9,60	5,80	3,81	2,80	2,18
750	20,4	9,59	5,80	3,81	2,79	2,16
1000	27,2	9,59	5,80	3,80	2,78	2,15
1250	34,0	9,59	5,80	3,79	2,77	2,13
1500	40,8	9,59	5,79	3,79	2,76	2,11
1750	47,6	9,59	5,79	3,78	2,74	2,09
2000	54,5	9,59	5,78	3,77	2,72	2,06
2250	60,0	9,39	5,66	3,68	2,64	1,98
2500	60,0	8,44	5,08	3,28	2,34	1,72
2750	60,0	7,66	4,60	2,95	2,08	1,50
3000	60,0	7,01	4,20	2,68	1,86	1,30
3250	60,0	6,46	3,86	2,44	1,67	1,13
3500	60,0	5,98	3,56	2,24	1,50	0,97
3750	60,0	5,58	3,31	2,05	1,34	0,82
4000	60,0	5,22	3,08	1,89	1,20	0,67
4250	60,0	4,90	2,88	1,74	1,07	0,54
4500	60,0	4,62	2,70	1,61	0,94	0,40
4750	60,0	4,36	2,54	1,48	0,82	0,27
5000	60,0	4,13	2,39	1,37	0,71	0,14



Slika 4.7. Dijagram ubrzanja u pojedinom stupnju prijenosa

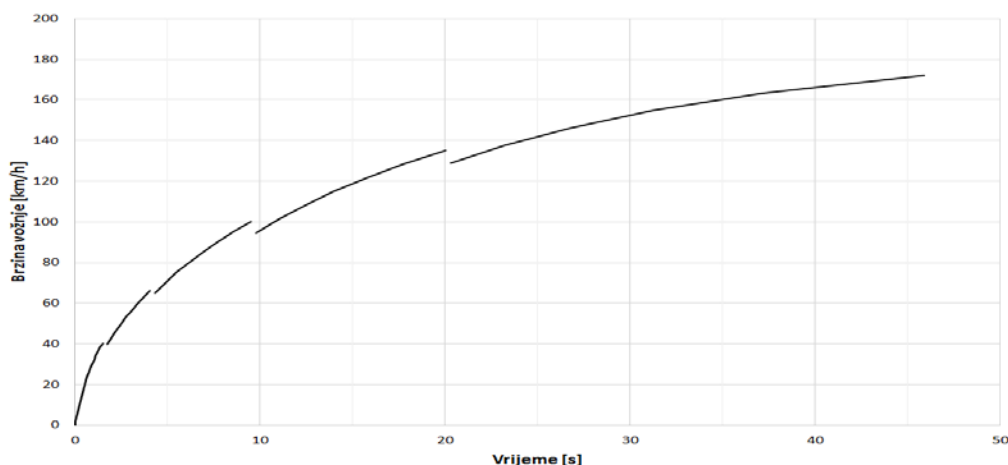
Uspoređujući dijagrame ubrzanja vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem i električnog vozila jasno je vidljivo da električno vozilo ima višestruko veće iznose ubrzanja od izvornog vozila. Najveći iznos ubrzanja vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem iznosi $3,51 \text{ m/s}^2$ dok je najveći iznos ubrzanja električnog vozila $9,60 \text{ m/s}^2$. Tako velika razlika u iznosima ubrzanja će se odraziti na trajanju ubrzanja od 0 – 100 km/h.

Za potrebe gradske vožnje nije potrebno koristiti svih pet stupnjeva prijenosa već je moguće voziti samo u 2 do 3 stupnja prijenosa, npr. korištenje samo trećeg i četvrtog stupnja prijenosa bi trebalo biti dostatno za ostvarivanje solidnih ubrzanja i brzine vožnje do 80 km/h pri vožnji bez uspona.

Tablica 4.6. Trajanje ubrzanja od 0 km/h do maksimalne brzine

n [min ⁻¹]	v_1 [km/h]	t_1 [s]	v_2 [km/h]	t_2 [s]	v_3 [km/h]	t_3 [s]	v_4 [km/h]	t_4 [s]	v_5 [km/h]	t_5 [s]
0	0,0	0,00	0,0		0,0		0,0		0,0	
250	2,0	0,00	3,3		5,0		6,8		8,6	
500	4,0	0,06	6,6		10,0		13,5		17,2	
750	6,1	0,12	9,9		15,0		20,3		25,8	
1000	8,1	0,18	13,3		20,0		27,0		34,4	
1250	10,1	0,23	16,6		25,0		33,8		43,0	
1500	12,1	0,29	19,9		30,1		40,6		51,6	
1750	14,1	0,35	23,2		35,1		47,3		60,2	
2000	16,1	0,41	26,5		40,1		54,1		68,8	
2250	18,2	0,47	29,8		45,1		60,8		77,4	
2500	20,2	0,53	33,2		50,1		67,6		86,0	
2750	22,2	0,59	36,5		55,1		74,4		94,6	
3000	24,2	0,67	39,8	1,75	60,1		81,1		103,1	
3250	26,2	0,75	43,1	1,97	65,1	4,32	87,9		111,7	
3500	28,3	0,83	46,4	2,21	70,1	4,89	94,6	9,78	120,3	
3750	30,3	0,93	49,7	2,47	75,1	5,51	101,4	11,03	128,9	20,28
4000	32,3	1,03	53,0	2,75	80,1	6,19	108,2	12,43	137,5	23,21
4250	34,3	1,14	56,4	3,04	85,2	6,92	114,9	14,00	146,1	26,76
4500	36,3	1,25	59,7	3,36	90,2	7,72	121,7	15,76	154,7	31,22
4750	38,3	1,37	63,0	3,70	95,2	8,59	128,4	17,75	163,3	37,15
5000	40,4	1,50	66,3	4,07	100,2	9,53	135,2	20,03	171,9	45,90

Iz tablice 4.6. i slike 4.8. lako se očita ubrzanje od 0 – 100 km/h koje iznosi 9,53 s što je za 4,5 s kraće od originalnog vozila prema proračunu, odnosno 2,5 s kraće od deklariranog vremena od strane proizvođača.



Slika 4.8. Dijagram trajanja ubrzanja električnog vozila od 0 km/h do maksimalne brzine

5. ANALIZA I UPOREDBA REZULTATA

5.1. Usporedba vozila prije i poslije prerade

U tablici 5.1. su prikazane karakteristike vozila prije i poslije prerade.

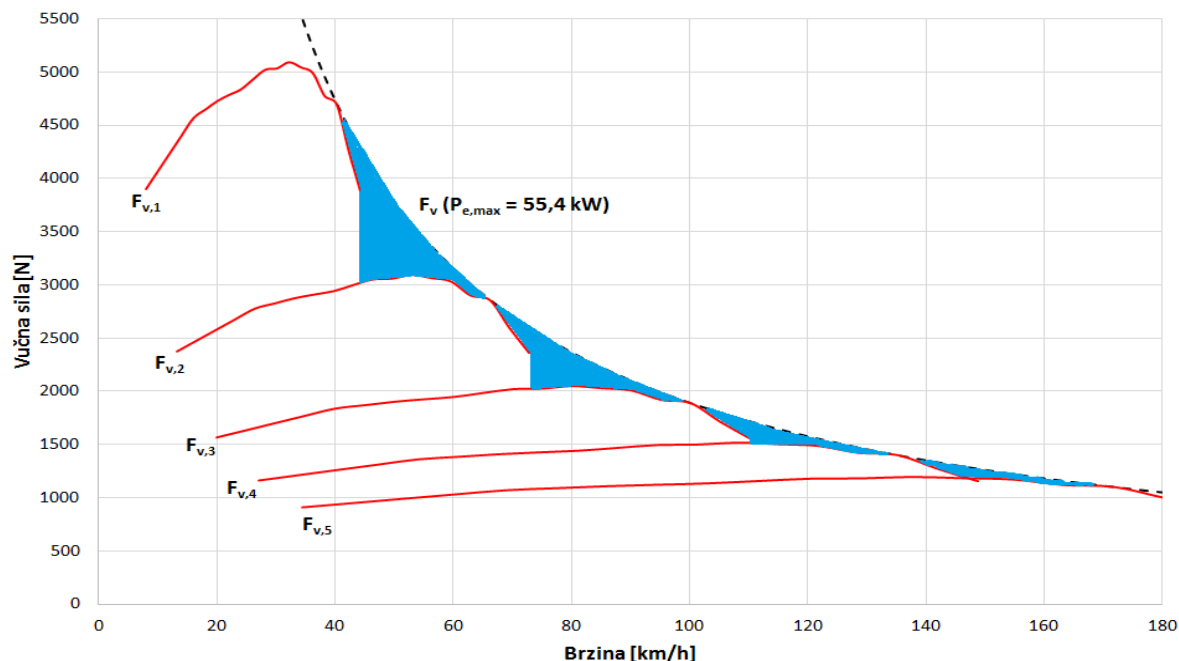
Tablica 5.1. Karakteristike izvornog i električnog vozila

	Izvorno vozilo	Električno vozilo
Vrsta motora	Ottov motor	Trofazni asinkroni izmjenični kavezni elektromotor
Snaga	55 kW	30 kW (60 kW)
Moment	126 Nm	130 Nm (260 Nm)
Mjenjač	Rukom upravljani, 5 stupanjski	Rukom upravljani, 5 stupanjski
Ubrzanje od 0 – 100 km/h	12 s	9,5 s
Ubrzanje od 0 do maksimalne brzine, 172 km/h	60,9 s	45,9 s
Volumen spremnika goriva/kapacitet baterije	34 dm ³	28,56 kWh
Masa praznog vozila	895 kg	991 kg
Dopuštena nosivost	485 kg	389 kg
Maksimalna nosivost	1380 kg	1380 kg
Domet NEDC/WLTC	567 km	182 km

Vidljivo je da elektromotor ima višu maksimalnu snagu, ali se ona može koristiti do maksimalno 2 minute. Snaga Ottovog motora je nešto manja (55 kW), ali nije vremenski limitirana. Mana Ottovog motora je ta što se maksimalna snaga ostvaruje u samo jednoj točki radnog područja, odnosno samo pri jednoj brzini vrtnje. Kod elektromotora se maksimalna snaga ostvaruje kroz određeno radno područje, odnosno kroz interval brzina vrtnje motora. Isti zaključci vrijede i za maksimalni moment.

Razlika ubrzanja od 0 – 100 km/h iznosi 2,5 s, a razlika ubrzanja od 0 do maksimalne brzine je još izraženija, 15 s. Toliike razlike su nastale zbog toga što su vučne karakteristike elektromotora znatno bliže vučnoj hiperboli, odnosno elektromotor ima manje neiskorištenog područja. Neiskorišteno područje kod Ottovog motora je izrazito veliko između prvog i drugog stupnja prijenosa (slika 5.1.) te bi se moglo smanjiti povećanjem prijenosnog omjera drugog stupnja prijenosa ili povećanjem broja stupnjeva prijenosa.

Masa vozila nakon prerade je porasla za 96 kg što ujedno utječe i na smanjenje dopuštene nosivosti u istom iznosu. Povećanje mase uzrokovano je uglavnom zbog velike mase baterija. Povećanjem specifične energije baterije će se razlika u masi smanjivati uz nepromjenjen kapacitet.



Slika 5.1. Prikaz neiskorištenog područja između vučne hiperbole i vučnih sila

5.2. Potrošnja i emisija CO₂

5.2.1. Električno vozilo

Energija utrošena za svađavanje WLTC ciklusa računa se prema izrazu:

$$E_i = \frac{\frac{\Delta E_i}{1000} + E_{i-1}}{\eta_{ev}}, [\text{kWh}], \quad (5.1)$$

$$\Delta E_i = \frac{(P_{R,i} + P_{R,i-1}) \cdot 1000}{2} \cdot \frac{t_i - t_{i-1}}{3600}, [\text{Wh}]. \quad (5.2)$$

gdje su:

E_i – kumulativ utrošene energije, [kWh],

ΔE_i – utrošena energija, [Wh],

$P_{R,i}$ – snaga potrebna za svađavanje otpora, [kW],

t_i – vrijeme, [s],

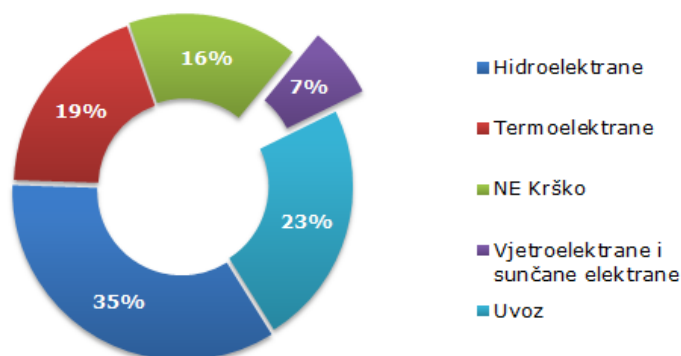
$\eta_{ev} = 0,7$ – stupanj korisnosti od baterije do kotača.

U navedene izraze uračunat je stupanj korisnosti električnog vozila od baterije do kotača η_{ev} da bi se odmah dobila vrijednost energije koja je utrošena iz baterije.

Vrijednost utrošene energije iz baterije iznosi 3,64 kWh po ciklusu, a prijeđeni put WLTC ciklusa iznosi 23262,4 m. Iz tih podataka izračunala se potrošnja električne energije po

prijeđenom kilometru, a ona iznosi 156,6 Wh/km odnosno 0,157 kWh/km. Iz tih vrijednosti izračunala se potrošnja električne energije za prijeđeni put od 130 km koji je zadan kao potreban domet vozila s jednim punjenjem. Iznos potrošnje na 130 km je 20,36 kWh, ali kako baterije imaju iskoristivost oko 80 % pohranjene električne energije (potrošnja većeg udjela električne energije oštećuje bateriju i skraćuje joj životni vijek) ta brojka je podijeljena s 0,8 kako bi se dobio iznos potrebne električne energije pohranjene u bateriji od 25,45 kWh.

Izvori električne energije u Hrvatskoj prema podacima HEP-a prikazani su na slici 5.2.



Slika 5.2. Izvori električne energije u Hrvatskoj [24]

Iz [25] preuzete su vrijednosti o emisiji CO₂ za pojedine izvore energije. Vrijednosti su prikazane u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Emisije CO₂ prema energentima

Emisija CO ₂ prema energentima	[g/kWh]
Ugljen	1000
Prirodni plin	443
Vjetar	9,5
Nuklearna energija	66
Hidroelektrane	12
Sunce	32
EU-mix	435

Množenjem postotka izvora električne energije i emisije CO₂ tog izvora dobije se ukupan iznos CO₂ emisija po energentu, a zbrajanjem svih emisije po energentu dobiva se ukupna emisija CO₂ za Hrvatski miks izvora struje.

Tablica 5.3. Ukupna emisija CO₂ za Hrvatski miks struje

Izvori električne energije u Hrvatskoj	[%]	[g/kWh]
Hidroelektrane	35	4,2
Termoelektrane	19	190
Nuklearne elektrane	16	10,6
Vjetro i solarne elektrane	7	2,9
Uvozna električna energija	23	100,1
Ukupno	100	307,7

U tablici 5.4. je prikazana usporedba emisija CO₂ po kilometru puta i emisija CO₂ po WLTC ciklusu za miks električne energije u Hrvatskoj, električnu energiju dobivenu samo iz ugljenom pogonjenih termoelektrana i električnu energiju dobivenu samo iz termoelektrana koje koriste prirodni plin kao energent.

Tablica 5.4. Emisija CO₂ po prijednom kilometru i WLTC ciklusu

	Hrvatski miks	Ugljen	Prirodni plin
Emisija CO ₂ po kilometru, [g/km]	48,19	156,6	69,4
Emisija CO ₂ po WLTC ciklusu, [kg]	1,12	3,64	1,61

Iz tablice 5.4. je vidljivo da je emisija CO₂ najmanja upravo za miks električne energije u Hrvatskoj te da je ugljen energent koji emitira najveću emisiju CO₂. Dodatno smanjenje emisija CO₂ bi se moglo postići modernizacijom postojećih termoelektrana. Uvođenjem plinskih turbina i prirodnog plina kao pogonskog energenta umjesto ugljena, smanjila bi se emisija CO₂ iz termoelektrana za otprilike 56 % što bi rezultiralo još nižom emisijom CO₂ u Hrvatskom miksu.

5.2.2. Izvorno vozilo

Zbog nedostatka podataka (topografski dijagram specifične efektivne potrošnje goriva) za izračun potrošnje po WLTC ciklusu koristila se deklarirana potrošnja za mješovitu vožnju koja iznosi 6 dm³/100 km te su prema njoj izračunate emisije CO₂.

Iz [26] su preuzeti podaci o karakteristikama benzinskog goriva, a iz [27] podaci o emisiji CO₂ od izvora do spremnika (*engl. Well-to-tank*). Vrijednosti su prikazane u tablici 5.5.

Tablica 5.5. Karakteristike benzina i emisija CO₂ od bušotine do vozila

Donja ogrijevna vrijednost benzinskog goriva, H_d	[MJ/kg]	42,7
	[MJ/dm ³]	32,0
Maseni udio ugljika u benzinskom gorivu, c	[kg/kg]	0,884
Gustoća benzinskog goriva, ρ	[kg/m ³]	0,750
Emisija CO ₂ od izvora do spremnika	[g/MJ]	12,5

Stehiometrijskom jednadžbom potpunog izgaranja ugljika C, masenog udjela ugljika c u benzinskom gorivu te gustoće benzinskog goriva dobila se emisija CO₂ po dm³ goriva. Emisija CO₂ os izvora do spremnika po dm³ dobila se iz donje ogrijevne vrijednosti benzinskog goriva H_d i emisije CO₂ od izvora do spremnika po MJ. Rezultati su prikazani u tablici 5.6.

Tablica 5.6. Ukupna emisija CO₂ vozila s Otovim motorom

Emisija CO ₂ izgaranjem 1 dm ³ goriva	[kg CO ₂ /dm ³ G]	2,43
Emisija CO ₂ izvora do spremnika	[kg CO ₂ /dm ³ G]	0,4
Ukupna emisija CO ₂	[kg CO ₂ /dm ³ G]	2,83

U tablici 5.7. prikazana je ukupna emisija CO₂ po prijeđenom kilometru.

Tablica 5.7. Ukupna emisija CO₂ po prijeđenom kilometru i WLTC ciklusu

Deklarirana mješovita potrošnja goriva	[dm ³ /100km]	6,0
Emisija CO ₂ po kilometru vožnje	[g CO ₂ /km]	145,86
Emisija CO ₂ po kilometru od izvora do spremnika	[g CO ₂ /km]	24,00
Ukupna emisija CO ₂ po kilometru	[g CO ₂ /km]	169,86

Množenjem ukupne emisije CO₂ po prijeđenom kilometru iz tablice 5.7. s prevaljenim putem po WLTC ciklusu (23,26 km) dobila se emisija CO₂ po ciklusu u iznosu od 3,95 kg CO₂.

Vidi se da je emisija CO₂ električnog vozila znatno manja od emisije CO₂ izvornog vozila s Ottovim motorom. Tek kad bi se sva električna energija u Hrvatskoj proizvodila iz ugljena došlo bi do približnog poravnania emisija CO₂.

Treba uzeti u obzir da ovi podaci mogu znatno varirati od vozila do vozila te kao takvi ne predstavljaju primjer prema kojem se treba ravnati. Razlika ukupnih emisija će ponajviše ovisiti o potrošnjama vozila prije i nakon prerade te o izvorima električne energije države u kojoj se izvodi prerada.

6. TROŠAK PRERADE

6.1. Troškovnik

U trošak prerade uračunate su samo cijene komponenata električnog pogona. Vozilo je u vlasništvu Fakulteta, odnosno Laboratorija za motore i vozila te njegova cijena nije uključena u trošak prerade. Također u trošak prerade nisu uključeni troškovi eventualnih mehaničarskih, električarskih, limarskih i bravarskih radova te strojne obrade. U trošak također nisu uračunati troškovi atesta i registracije vozila.

Tablica 6.1. Troškovnik dijelova električnog pogona potrebnog za preradu vozila

Komponente	Cijena u €	Cijena u kn
Elektromotor, frekvencijski pretvarač	5.990	44.600
Baterije	9.850	73.300
BMS	900	6.700
Punjač	1.900	14.150
Potrošni materijal, spojni pribor	500	3.720
UKUPNO	19.140	142.470

Vidljivo je da najveći udio u trošku predstavljaju baterije, čak 51,45 %. Trošak bi se mogao smanjiti kupovinom korištenih komponenti, ali se tu javlja problem potrošenosti komponenti.

6.2. Analiza isplativosti

Uz iste vozne cikluse i opterećenja vozilo s Ottovim motorom i spremnikom goriva od 34 dm³ uz prosječnu deklariranu potrošnju od 6 dm³/100 km prijeđe 567 km dok vozilo s električnim motorom i baterijom koja može pohraniti 28,56 kWh iskoristive električne energije uz potrošnju od 0,157 kWh/km može prijeći 182 km. Vidljivo je da vozilo s Ottovim motorom ima 3,12 puta veći domet s jednim spremnikom od električnog vozila.

Tablica 6.2. Potrošnja i domet s jednim spremnikom

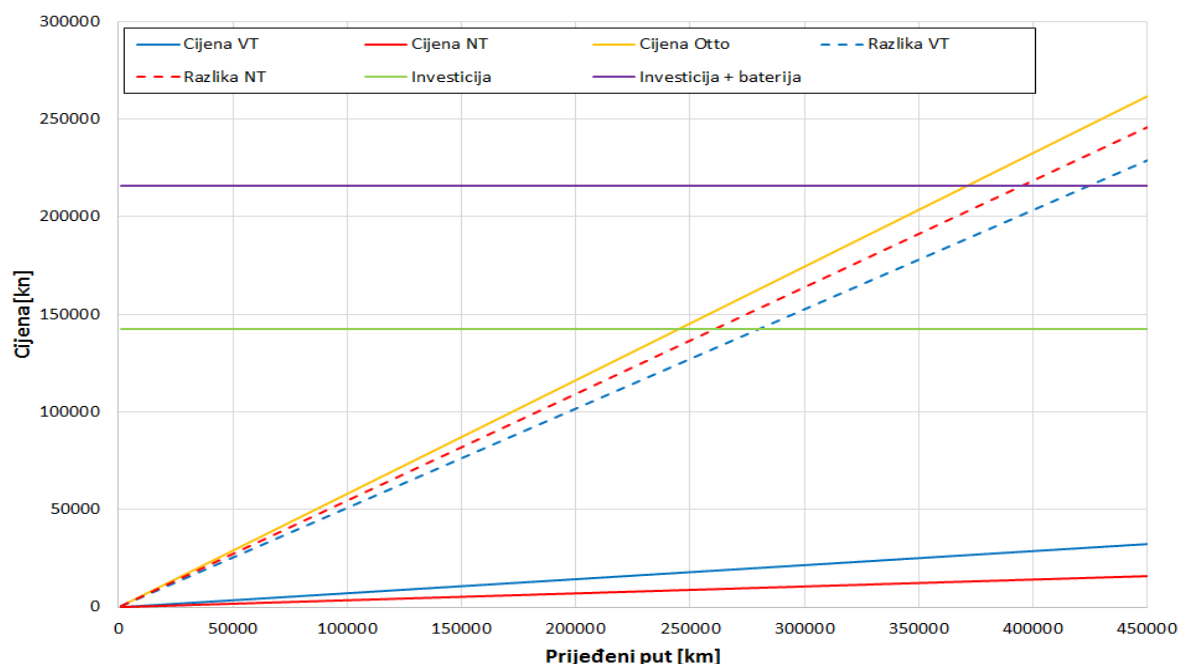
	Izvorno vozilo	Električno vozilo
Spremnik goriva/električne energije	34 dm ³	28,56 kWh (iskoristivo)
Potrošnja goriva/električne energije	6 dm ³ /100 km	0,157 kWh/km
Domet s jednim spremnikom	567 km	182 km

Ako se uzme u obzir da cijena benzina iznosi $9,69 \text{ kn/dm}^3$ (21.2.2017.), a cijena kWh električne energije po višoj tarifi (VT) $0,35 \text{ kn/kWh}$ te po nižoj tarifi (NT) $0,17 \text{ kn/kWh}$ dobiju se slijedeći rezultati. Cijena punog spremnika goriva iznosi $329,46 \text{ kn}$ što po prijađenom kilometru iznosi $0,58 \text{ kn/km}$. Da bi se izračunala potrošena električna energija tijekom punjenja potrebno je količinu iskoristive energije baterije ($28,56 \text{ kWh}$) uvećati za gubitke koji će nastati pri radu punjača i samih baterija. Procjenjene vrijednosti korisnosti su 95% za punjač i 80% za bateriju. Kad se pomnože te dvije vrijednosti dobije se stupanj korisnosti punjenja 76% . Potrošena električna energija za punjenje iskoristive električne energije baterije iznosi $37,58 \text{ kWh}$. Cijena jednog punjenja je $13,15 \text{ kn}$ po VT odnosno $6,39 \text{ kn}$ po NT. Cijena po prijađenom kilometru iznosi $0,0721 \text{ kn/km}$ za VT odnosno $0,0350 \text{ kn/km}$ za NT. Dakle po prijađenom kilometru je električno vozilo jeftinije $8,04$ puta ako se puni na VT odnosno $16,57$ puta ako se puni na NT.

Tablica 6.3. Cijena vožnje po kilometru

	Izvorno vozilo	Električno vozilo
Cijena punog spremnika goriva/baterije	$329,46 \text{ kn}$	$13,15 \text{ kn VT}$ $6,39 \text{ kn NT}$
Cijena po prijađenom kilometru	$0,58 \text{ kn/km}$	$0,0721 \text{ kn/km VT}$ $0,0350 \text{ kn/km NT}$

Godišnje prijađeni put prema [17] za osobna vozila iznosi 12.500 km , odnosno 62.500 km u 5 godina. Trošak energenta (benzina i električne struje) prema izračunatim vrijednostima cijene po kilometru iznosi 36.250 kn za vozilo s Ottovim motorom i $4.506,25 \text{ kn}$ za električno vozilo punjeno VT, odnosno $2.187,5 \text{ kn}$ za NT. Iznos uštede na energentu kroz 5 godina je između $31.753,75$ i $34.062,5 \text{ kn}$.



Slika 6.1. Dijagram isplativosti i povrata investicije

Kao što se vidi iz dijagrama na slici 6.1. investicija će se u potpunosti isplatiti tek između 260.000 i 280.000 km, a za postizanje uštede u iznosu cijene nove baterije potrebno je prijeći između 395.000 i 424.000 km. Upitno je hoće li baterija izdržati dovoljan broj kilometara da se uopće isplati investicija.

Obzirom na potrebnu investiciju u preinaku ili u novo električno vozilo u odnosu na konvencionalna, moguća ušteda ne može biti kriterij. Kriterij može biti porast ekološke svijesti, energetska učinkovitost, smanjene emisije CO₂ i štetnih tvari, posebice ako se promatra lokalno, u gradovima jer ovakvo vozilo prvenstveno ima svrhu za gradske relacije.

7. ZAKLJUČAK

U radu je provedena analiza električnog vozila s gledišta performansi, energetske potrebe, emisija CO₂ i financijske isplativosti.

Pregledom svih podataka dobivenih proračunom i analizama zaključuje se da su električna vozila još uvijek neisplativa s aspekta financija. Razlog tome je ponajviše visoka cijena baterija te njihova mala specifična energija. Daljnjim razvojem baterija, odnosno povećanjem specifične energije bi se smanjila masa vozila, posljedično i otpori odnosno snaga potrebna za svladavanje istih što bi na kraju rezultiralo manjom potrošnjom električne energije odnosno većim dometom s jednim punjenjem.

Emisija CO₂ električnog vozila je znatno manja od emisije CO₂ izvornog vozila (3,52 puta manja). Povećanjem broj električnih vozila u gradovima bi se poboljšala kvaliteta zraka jer električna vozila lokalno ne emitiraju CO₂ već je njihova emisija rezultat proizvodnje električne energije u elektranama koje se obično nalaze izvan gradova.

Odabirom motora odgovarajuće snage zadržane su sve vozne karakteristike izvornog vozila, dapače neke su čak i poboljšane obzirom na povoljne vanjske karakteristike električnog motora. Iz sveg navedenog zaključuje se da budućnost električnih automobila ponajviše ovisi o tehnološkom napretku baterija kao najslabije komponente električnog pogona.

LITERATURA

- [1] <http://www.auto.de/magazin/vor-110-jahren-lohner-porsche-mit-elektrischem-radnabenantrieb-auf-der-weltausstellung-in-paris/> (14.2.2017.)
- [2] M. Stojkov, D. Gašparović, D. Pelin, H. Glavaš, K. Hornung, N. Mikulandra; Električni automobil - povijest razvoja i sastavni dijelovi; 2014.
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_electric_vehicle (14.2.2017.)
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Nissan_Leaf (15.2.2017.)
- [5] http://www.electricvehiclewiki.com/Battery_specs (15.2.2017.)
- [6] <https://www.nissanusa.com/electric-cars/leaf/> (15.2.2017.)
- [7] <http://www.caranddriver.com/bmw/i3> (15.2.2017.)
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/BMW_i3 (15.2.2017.)
- [9] <http://bmwi3.blogspot.hr/2016/05/heres-why-i3-battery-upgrade-currently.html> (15.2.2017.)
- [10] https://en.wikipedia.org/wiki/Volkswagen_Golf#Volkswagen_e-Golf (15.2.2017)
- [11] Prof. Dr.Ing. Wolfgang Steiger; The Future of Cars and Powertrains based on technical, social and political framework conditions; Sustainable Technologies Conference; Zurich, 2011.
- [12] http://media.vw.com/doc/1142/2015_volkswagen_e-golf_versatile_fun-to-drive_and_with_zero_tailpipe_emissions-2015_e-golf_specifications-88829706253fe01587e9c3.pdf (15.2.2017.)
- [13] http://www.caricos.com/cars/v/vw/2015_volkswagen_e-golf/#6 (15.2.2017.)
- [14] <http://sufiy.blogspot.hr/2010/10/lithium-metal-polymer-battery-from-dbm.html> (15.2.2017.)
- [15] <http://www.auto-motor-und-sport.de/audi/a2/technische-daten/> (15.2.2017.)
- [16] <http://www.cvh.hr/tehnicki-pregled/statistika/> (15.2.2017.)
- [17] <https://www.dieselneta.com/standards/cycles/wltp.php> (13.2.2017.)
- [18] <http://rototest-research.eu/popup/performancegraphs.php?ChartsID=558> (15.2.2017.)
- [19] Bosch Automotive Handbook; Bentley Publishers; 2000.
- [20] http://www.e-transportation.eu/catalog/product.php?id_product=80 (16.2.2017.)
- [21] Isidor Buchmann; Basics about Batteries, training series; 2014.
- [22] http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion (16.2.2017.)
- [23] <http://www.batteryspace.com/prod-specs/NCR18650B.pdf> (22.2.2017.)

- [24] <http://www.hep.hr/ods/kupci-154/izvori-elektricne-energije/40> (20.2.2017.)
- [25] Ricardo Faria, Pedro Marques, Pedro Moura, Fausto Freire, Joaquim Delgado, Aníbal T. de Almeida; Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles; Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013.
- [26] Ivan Mahalec, Zoran Lulić, Darko Kozarac; Motori s unutarnjim izgaranjem – interna skripta; FSB Zagreb, 2012.
- [27] Description and detailed energy and GHG balance of individual pathways; Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context WELL-TO-TANK Report Version 3.0 November 2008.
- [28] Zoran Lulić, Krunoslav Ormuž, Goran Šagi; Motorna vozila – interna skripta; 2016.

PRILOZI

- I. CD-R
- II. Karakteristike baterije Panasonic NCR18650B
- III. Izvadak iz kataloga za električni motor Ansaldo

PRILOG II.

Panasonic Lithium Ion NCR18650B

Features & Benefits

- High energy density
- Long stable power and long run time
- Ideal for notebook PCs, boosters, portable devices, etc.

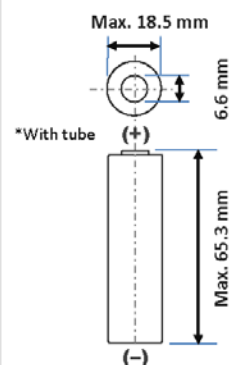
* At temperatures below 10°C, charge at a 0.25C rate.

Specifications

Rated capacity ⁽¹⁾	Min. 3200mAh
Capacity ⁽²⁾	Min. 3250mAh Typ. 3350mAh
Nominal voltage	3.6V
Charging	CC-CV, Std. 1625mA, 4.20V, 4.0 hrs
Weight (max.)	48.5 g
Temperature	Charge*: 0 to +45°C Discharge: -20 to +60°C Storage: -20 to +50°C
Energy density ⁽³⁾	Volumetric: 676 Wh/l Gravimetric: 243 Wh/kg

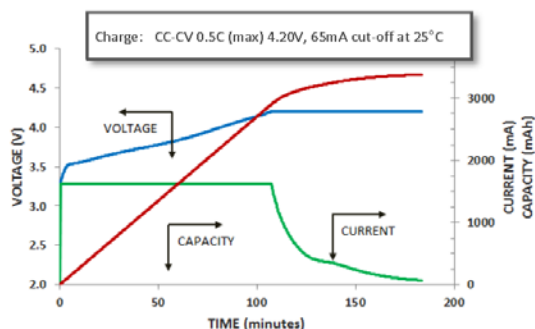
⁽¹⁾ At 20°C ⁽²⁾ At 25°C ⁽³⁾ Energy density based on bare cell dimensions

Dimensions

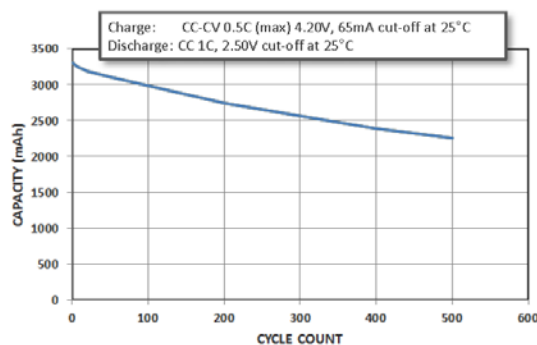


For Reference Only

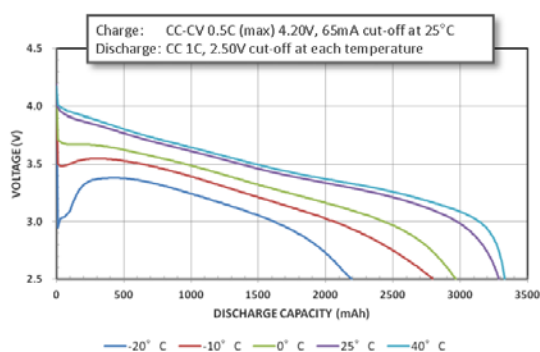
Charge Characteristics



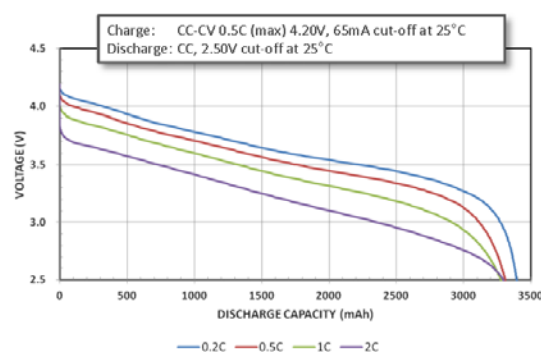
Cycle Life Characteristics



Discharge Characteristics (by temperature)



Discharge Characteristics (by rate of discharge)



The data in this document is for descriptive purposes only and is not intended to make or imply any guarantee or warranty.

PRILOG III.



Ansaldo Electric Drives S.p.A.

ELECTRIC DRIVE 40 kW –ECE 85
30/ 60 kW - TECHNICAL CHARACTERISTICS

General Characteristics		
nominal battery voltage	[V]	288
battery voltage range	[V]	180÷400
power (nominal / peak)	[kW]	30 / 60
operating temperature range	[°C]	- 20 ÷ + 65
cooling system (flow rate)		water + glycol (10 [l/min])
total pressure drop (motor + inverter)	[bar]	0.1
max. cooling temperature	[°C]	60

Electric Motor Characteristics		
type		AC drive (squirrel cage induction)
code		AxH 207B 42Gxxx (1)
nominal power (ECE 85) (S2 5 min)	[kW]	40 (3000 rpm)
nominal power (continuous duty)	[kW]	30 (2200÷9000 rpm)
peak power (≤ 2 min.)	[kW]	60 (2200÷4500 rpm)
peak power (≤ 30 min.)	[kW]	30 (2200÷9000 rpm)
phase number		3
pole number		4
nominal speed	[r.p.m.]	3000
max. operating speed	[r.p.m.]	9000
Abs. max. speed	[r.p.m.]	10000
rated torque (0 ÷ 2200 [r.p.m.])	[Nm]	130
max. torque (0 ÷ 2200 [r.p.m.]) (≤ 1 min.)	[Nm]	260
insulation system		class H
temperature rise		see IEC 349
mounting arrangement		IM 3001 (1M B5)
protection degree		IP 56
bearings		ball bearing
lubrification system		grease
housing material		aluminium
end-shield material		aluminium
dimensions LxØ (ex. shaft extension)	[mm]	440 x 240
weight	[Kg]	80

(1)

The motor is made in different versions:

A2H207B42G000 free cable - circular flange – shaft with key
A2H207B42G001 free cable - square flange – gloss shaft
A2H207B42G006 free cable - circular flange – slined shaft
A3H207B42G000 terminal box – circular flange – shaft with key
A3H207B42G001 terminal box – square flange – gloss shaft
A3H207B42G006 terminal box – circular flange – slined shaft

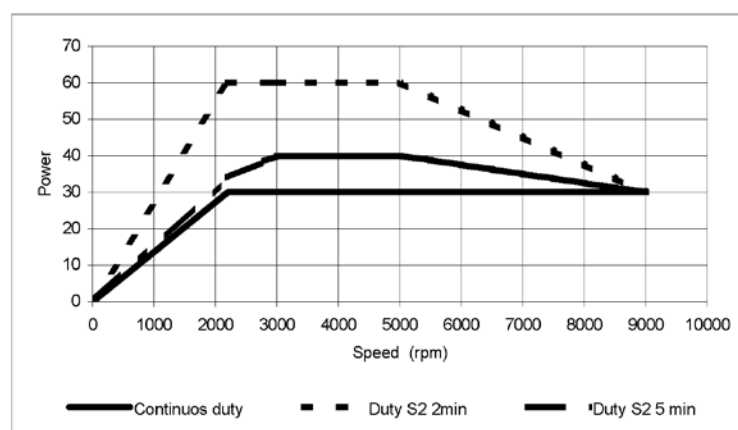
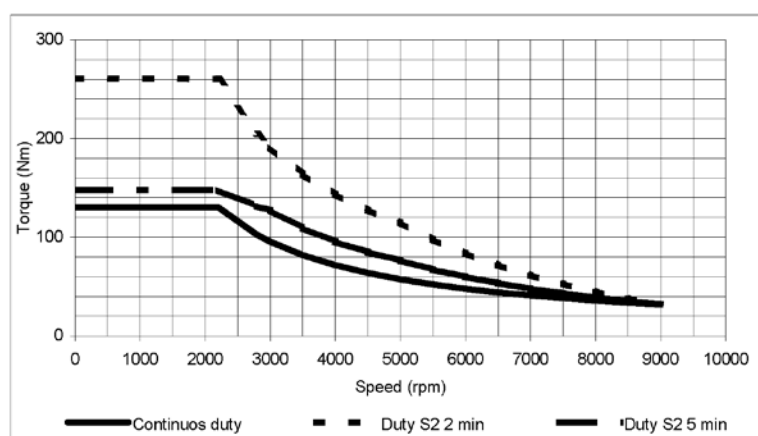
Id S0 6127025W00L
Rev 0

1



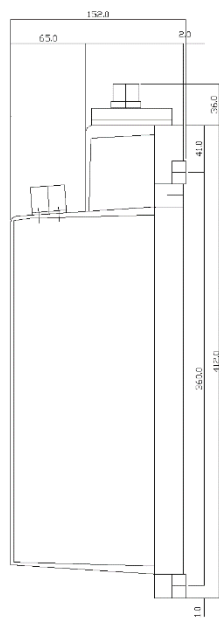
Ansaldo Electric Drives S.p.A.

Inverter Characteristics		
type		IGBT
code		I1H 130HG000
max. DC current	[Idc]	350
max AC current	[Iac]	400
modulation		PWM
max frequency	[Hz]	320
switching frequency	[kHz]	4
control		microprocessor
protection degree		IP 56
dimensions (L x l x h)	[mm]	450 x 340 x 152
weight	[Kg]	14

Id S0 6127025W00L
Rev 0

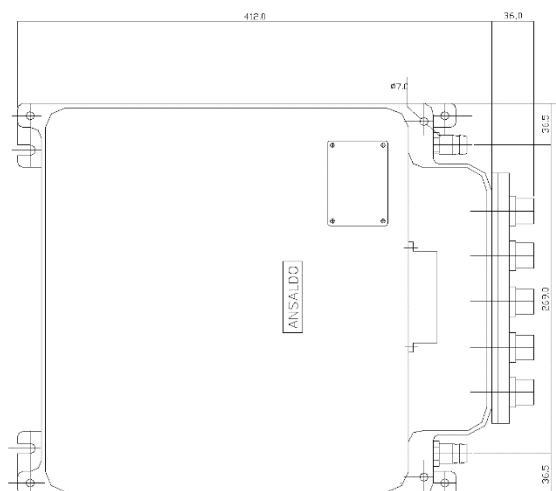
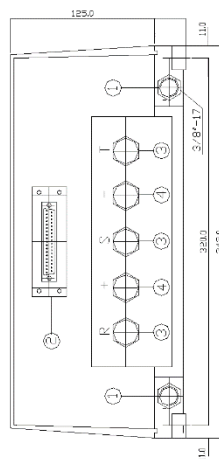
2

Ansaldo Electric Drives S.p.A.



- ① water inlet-outlet 3/8"
- ② 37 pin connector
- ③ connections to electric motor 35 mm
- ④ connections to battery 35 mm

ALL DIMENSIONS IN mm



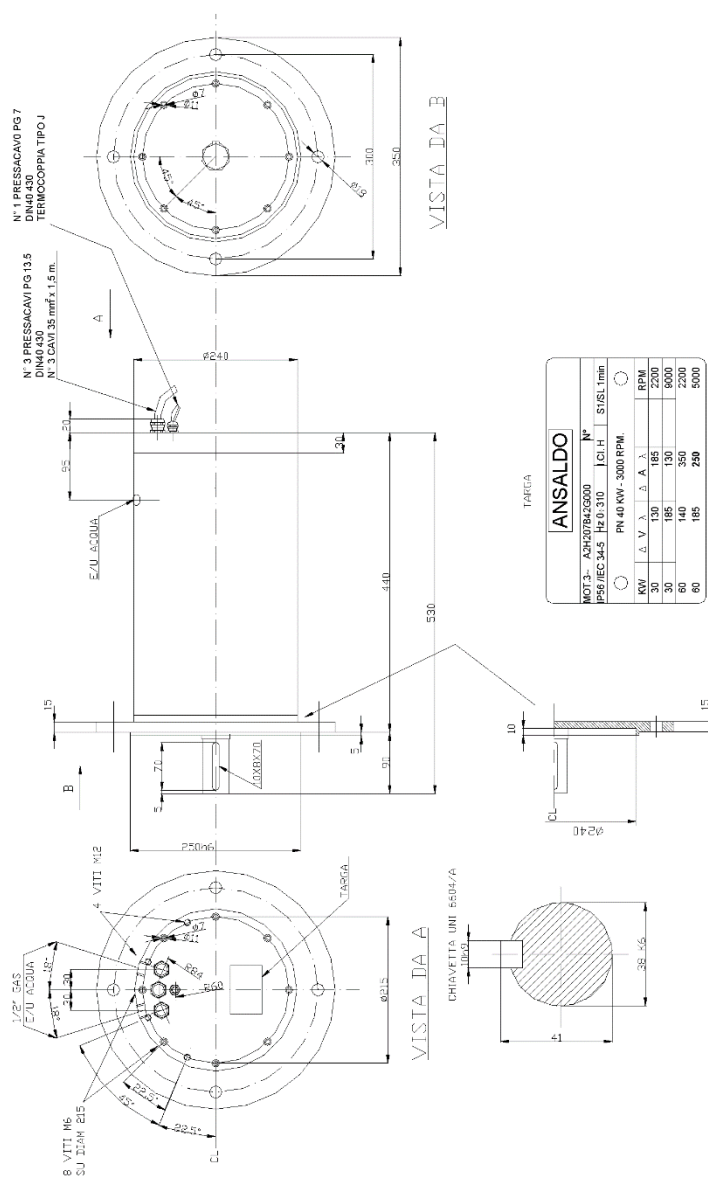
INVERTER – OVERALL DIMENSIONS

Id S0 6127025W00L
Rev 0

3



Ansaldo Electric Drives S.p.A.



Overall dimensions - Motor type A2H207B42G000

Id S0 6127025W00L
Rev 0